

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



EPSEM

GRAU EN ENGINYERIA QUÍMICA

L'ALTERNATIVA DE L'HIDROGEN EN EL MÓN DE L'AUTOMOCIÓ

ALBERT OJEDA MIRAPEIX

TREBALL FINAL DE GRAU

Tutor: PERE BUSQUETS RUBIÓ

Directora: M. ROSA ARGELAGUET

ISANTA

Manresa, 24 de Maig de 2019



AGRAÏMENTS

Agraeixo especialment al Pere Busquets, que des d'un principi m'ha guiat el treball, m'ha donat suport i m'ha ajudat a solucionar els problemes que se m'han plantejat al llarg del procés.

També dono les gràcies a l'equip docent de la universitat per aportar-me tots els coneixements que m'han conformat com a professional durant els quatre anys que he cursat.

Finalment vull nombrar als meus familiars, a la meva parella i als meus amics, que des de sempre m'han motivat a esforçar-me i m'han ajudat a superar els meus límits, per així créixer tant acadèmicament com personalment.

RESUM

El següent treball té com objectiu veure si els vehicles elèctrics de pila de combustible d'hidrogen té una viabilitat a curt/mig termini. Per això es farà una descripció breu de les diverses alternatives actuals existents dins del món de l'automoció, realitzant un anàlisi en detall del funcionament dels vehicles d'hidrogen i investigant sobre les possibilitats i maneres de produir el combustible, de com emmagatzemar-lo i de com utilitzar-lo.

Un cop s'hagi recopilat tota la informació prèvia, es proposa un cicle de residu zero partint de l'electròlisi de l'aigua per produir l'hidrogen i combinant l'element generat amb magnesi per emmagatzemar-lo en forma d'hidrur de magnesi.

A partir del model proposat es farà un estudi de viabilitat en el qual es conclourà que per a que l'alternativa sigui viable s'haurà de fer una gran inversió en la producció d'energia de font renovable i disminuir el preu d'adquisició dels vehicles a partir d'una producció en massa.

ABSTRACT

The goal of this actual project is to analyse the hydrogen fuel cell vehicles and conclude if it is a viable option in the short/medium term. Therefore, a description of various current alternatives within the automotive world will be made, making a detailed analysis of hydrogen vehicles and investigating the possibilities and ways to produce hydrogen fuel, how to store it and how to use it.

Once all the previous information has been collected, a zero-residue cycle is proposed starting from the electrolysis of water to produce hydrogen and combining the element generated with magnesium to store it in the form of magnesium hydride.

Based on the proposed model, a feasibility study will be carried out, this study will conclude in the necessity to make a large investment in order to produce the source of renewable energy, and then, decrease the acquisition price from the industrial production.

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ	10
2. SITUACIÓ ACTUAL	11
2.1 SITUACIÓ ACTUAL	11
2.2 AUTOMÒBIL DE COMBUSTIÓ INTERNA	14
2.2.1. AUTOMÒBILS DE GASOLINA	16
2.2.2 AUTOMÒBIL DE GASOIL	17
2.2.3 AUTOMÒBIL DE GAS LIQUAT DEL PETROLI	18
2.2.4 AUTOMÒBIL DE GAS NATURAL COMPRIMIT	19
2.2.5. AUTOMÒBIL DE COMBUSTIÓ INTERNA DE BIOGÀS	20
2.2.6. AUTOMÒBIL DE COMBUSTIÓ INTERNA D'HIDROGEN	22
2.3. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC	23
2.3.1. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC RECARREGABLE	26
2.3.2. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN	29
2.4. AUTOMÒBIL HÍBRID	30
2.5. COMPARACIÓ	31
3. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN	33
3.1. HISTÒRIA DE L'EVOLUCIÓ DELS V.E. DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN ...	33
3.2. ESTUDI DEL FUNCIONAMENT	37
3.3. REPTES TECNOLÒGICS	42
4. PRODUCCIÓ DE L'HIDROGEN	44
4.1. PRODUCCIÓ D'HIDROGEN A PARTIR DE COMBUSTIBLES FÒSSILS	45
4.1.1. REFORMAT D'HIDROCARBURS	45
4.1.2. OXIDACIÓ PARCIAL DELS HIDROCARBURS	46
4.1.3. GASIFICACIÓ	47
4.2. PRODUCCIÓ D'HIDROGEN A PARTIR DE FONTS RENOVABLES	48
4.2.1. ELECTRÒLISIS DE L'AIGUA	48

4.2.2. PROCESSOS TERMOQUÍMICS DE L'AIGUA.....	51
4.2.3 PRODUCCIÓ D'HIDROGEN A PARTIR DE BIOMASSA.....	52
4.3. COMPARACIÓ	53
5. EMMAGATZEMATGE I TRANSPORT DE L'HIDROGEN	54
5.1. EMMAGATZEMATGE DE L'HIDROGEN MITJANÇANT MÈTODES FÍSICS	56
5.1.1. HIDROGEN COMPRIMIT.....	56
5.1.2. HIDROGEN LÍQUID	59
5.1.3. HIDROGEN CRIO-COMPRIMIT	60
5.1.4. ADSORCIÓ PER CARBÓ ACTIVAT.....	60
5.2. EMMAGATZEMATGE DE L'HIDROGEN MITJANÇANT MÈTODES QUÍMICS	61
5.2.1. HIDRURS METÀL·LICS.....	61
5.2.2. ALUMINI.....	63
5.2.3. AMONÍAC.....	64
5.2.4. AMINA-BORÀ	65
5.2.5. LÍQUIDS ORGÀNICS.....	66
5.3. COMPARACIÓ	68
6. VIABILITAT.....	72
6.1. ESTUDI ENERGÈTIC	74
6.2. ESTUDI MEDIAMBIENTAL	77
6.3. ESTUDI ECONÒMIC	80
6.4. VIABILITAT A GRAN ESCALA.....	86
7. CONCLUSIÓ.....	87
8. REFERÈNCIES.....	89
9. ANNEXES.....	94
9.1. DISSENY DELS DIPÒSITS D'UN VEHICLE D'HIDROGEN QUE EMMAGATZEMA L'HIDRUR DE MAGNESI COM A COMBUSTIBLE	94
9.2. CONSUM ENERGÈTIC D'ELECTRÒLISI DE L'AIGUA.....	97
9.3. CONSUM ENERGÈTIC DE LA SÍNTESI D'HIDRUR DE MAGNESI	98
9.4. CONSUM ENERGÈTIC DEL RECICLATGE DE L'HIDRÒXID DE MAGNESI	99
9.5. CONSUM D'AIGUA.....	100

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Parts d'un motor de combustió interna	14
Figura 2. Pistó de quatre temps	16
Figura 3. Cicle del combustible de biogàs	21
Figura 4. Circuit elèctric d'un vehicle elèctric	23
Figura 5. Components d'un fre regeneratiu	24
Figura 6. Components d'un motor elèctric	24
Figura 7. Components d'un motor elèctric d'un vehicle	25
Figura 8. Thomas Edison amb un vehicle elèctric	34
Figura 9. Primer vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen	35
Figura 10. Esquema del funcionament d'un vehicle d'hidrogen	39
Figura 11 . Origen de l'hidrogen produït	44
Figura 12. Cel·la d'electròlisis d'aigua	49
Figura 13. Densitat de l'hidrogen respecte a la pressió	56
Figura 14. Tanques d'hidrogen comprimit tipus I, II, III i IV	57
Figura 15. Tanca d'hidrogen comprimit tipus I	57
Figura 16. Tanca d'hidrogen comprimit tipus II	58
Figura 17. Tanca d'hidrogen comprimit tipus IV	58
Figura 18 . Origen de l'energia elèctrica d'Espanya. Març 2018	76
Figura 19. Cost del kW d'una pila d'hidrogen en funció de la producció anual	80
Figura 20. Cost del kW d'una pila d'hidrogen en funció dels anys i la producció anual	80
Figura 21. Cost dels components característics i del combustible utilitzats al llarg de la vida útil del vehicle elèctric en funció de l'autonomia	84

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. Companyies d'automòbils que inverteixen en vehicles alternatius	12
Taula 2. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gasolina	17
Taula 3. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gasoil	18
Taula 4. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gas líquid del petroli	19
Taula 5. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gas natural comprimit	20
Taula 6. Avantatges i desavantatges automòbils de biogàs	21
Taula 7. Avantatges i desavantatges automòbils de combustió interna d'hidrogen	22
Taula 8. Tipus de bateries	28
Taula 9. Avantatges i desavantatges d'un automòbil híbrid	30
Taula 10. Avantatges i desavantatges entre un automòbil de combustió i un elèctric	31
Taula 11. Mètodes de l'electròlisi de l'aigua	53
Taula 12. Densitat de l'hidrogen respecte a la pressió	56
Taula 13. Emmagatzematge de l'hidrogen	68
Taula 14. Preu d'un tanc d'hidrogen comprimit de 700 bar tipo IV amb 64,40 litres, en funció de la producció anual	81
Taula 15. Comparació del cost del V.E. Recarregable amb el V.E. de Pila de Combustible d'Hidrogen	83



1. INTRODUCCIÓ

En l'actualitat, els vehicles propulsats per combustibles fòssils estan causant problemes a nivell mediambiental entre d'altres, fet que està contribuint a la investigació i al desenvolupament de noves tecnologies amb l'objectiu principal de substituir aquests vehicles contaminants per d'altres que siguin respectuosos amb el medi ambient i la salut de l'ésser humà.

Sembla ser que els vehicles elèctrics són la solució als problemes causats, però dins d'aquets, ens trobem dos vies alternatives, els ja coneguts vehicles elèctrics recarregables i els d'hidrogen que s'analitzaran en aquest treball.

L'objecte d'aquest treball és fer un estudi sobre la viabilitat dels vehicles d'hidrogen a curt/mig termini, des d'avui com a punt de partida, començant per una descripció breu de les diverses alternatives actuals existents dins del món de l'automoció, realitzant un anàlisi en detall del funcionament dels vehicles d'hidrogen i investigant sobre les possibilitats i maneres de produir el combustible, de com emmagatzemar-lo i de com utilitzar-lo.

Finalment, dins de l'estudi de viabilitat dels vehicles d'hidrogen, es proposarà un cicle de residu zero diferent a l'utilitzat actualment, amb l'objectiu d'aconseguir un mètode més viable i més sostenible.

Al llarg del treball, s'estudiaran els vehicles elèctrics recarregables i s'aniran comparant amb els d'hidrogen, ja que, en aquest moment, són la principal alternativa de l'automòbil cap a un futur immediat.

2. SITUACIÓ ACTUAL

2.1 SITUACIÓ ACTUAL

Avui en dia la situació dins del parc automobilístic indica que els vehicles que utilitzen com a font d'energia combustibles fòssils tendiran a desaparèixer, a causa de que són els responsables del 25% de les emissions de diòxid de carboni (CO_2), del 87% de las de monòxid de carboni (CO) i del 66% de las d'òxid de nitrogen (NO_x) (1). Totes aquestes emissions contribueixen a l'escalfament global, al deteriori del medi ambient i provoquen problemes de salut a l'esser humà, a òrgans com els pulmons, cor, ulls, pell o pàncreas, incrementant el risc de patir problemes respiratoris, càncers, infarts, insomni, diabetis... (2)

Actualment, en el món automobilístic s'ha començat a treure al mercat diferents alternatives que produeixen menors emissions contaminants que els vehicles de gasolina i gasoil, com són els vehicle híbrids, els elèctrics, els de GLP (gas liquat del petroli), els de GNC (gas natural comprimit) i els d'hidrogen. A continuació se citaran les diferents companyies que han invertit en les diferents alternatives:

COMPANIES	V. HÍBRID	V. ELÈCTRIC	V. GLP	V. GNC	V. HIDROGEN
Alfa Romeo			X		
Audi		X		X	
BMW	X	X			
Citroën		X	X		
Dacia			X		
DS	X		X		
Fiat			X	X	
Ford	X		X		
Honda	X				X
Hyuundai	X	X	X		X
Infiniti	X				
Jaguar		X			
Kia	X	X			
Land Rover	X				
Lexus	X				
Mercedes	X	X	X		
Mini	X				
Mitsubishi	X	X			
Nissan		X			
Opel			X		
Peugeot		X			
Porsche	X				
Renault	X	X	X		
Seat				X	
Skoda				X	
Smart		X			
SsangYong			X		
Subaru			X		
Suzuki	X				
Tesla		X			
Toyota	X				X
Volkswagen	X	X		X	
Volvo	X				

Taula 1. Companyies d'automòbils que inverteixen en vehicles alternatius. Font: (3) (4) (5) (6) (7)



Tot i així, s'estan plantejant diferents mesures per reduir les emissions, tan a nivell nacional com internacional. Dins de l'estat espanyol, els objectius a futur que es volen dur a terme per reduir la contaminació en relació al món de l'automoció són: (8) (9)

- L'any 2023 → Els municipis de més de 50.000 habitants hauran de disposar amb zones de baixes emissions.
- L'any 2030 → Les emissions de gasos d'efecte hivernacle s'hauran de reduir al menys un 20% respecte al 1990.
- L'any 2030 → El 70% de la generació elèctrica haurà de ser d'origen renovable.
- L'any 2040 → Es prohibirà la matriculació i venda de turismes i furgonetes que produeixin emissions de CO₂.
- L'any 2040 → Es posarà fi a les activitats de *fracking* i extracció d'hidrocarburs.
- L'any 2050 → Es prohibirà la circulació de turismes i furgonetes amb emissions de CO₂.
- L'any 2050 → El 100% de la generació elèctrica haurà de ser d'origen renovable.
- L'any 2050 → L'objectiu serà reduir les emissions un 90% respecte al 1990.

A nivell internacional, la prohibició de la matriculació i venda de turismes i furgonetes de combustibles fòssils varia en funció dels països. Noruega la vol portar a terme en el 2025, altres com Àustria, Dinamarca, Eslovènia, Índia, Irlanda, Israel i Països Baixos en el 2030, finalment França, el Regne Unit, Taiwan i Xina en el 2040. (10)

En endavant, quin o quins tipus d'automòbils faran possible el compliment d'aquests objectius? Per explicar-ho, cal començar analitzant les diferents alternatives de vehicles que existeixen avui en dia.

2.2 AUTOMÒBIL DE COMBUSTIÓ INTERNA

Aquest automòbil conté un tipus de màquina que obté energia mecànica directament de l'energia química d'un combustible que crema dins de la cambra de combustió.

La part encarregada de transformar l'energia química en energia mecànica és el motor, que ha d'aconseguir generar la suficient força per a que les rodes girin i el vehicle pugui desplaçar-se.

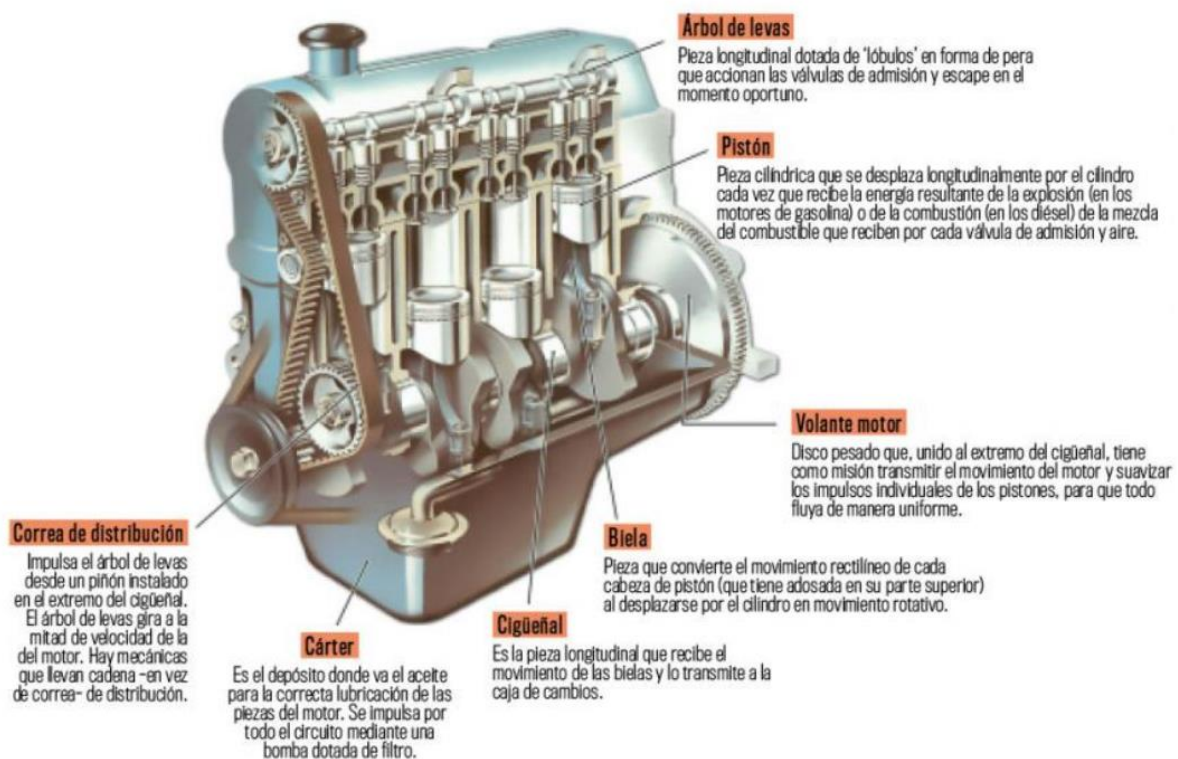


Figura 1. Parts d'un motor de combustió interna. Font: (11)

Els dos components bàsics que estructuren el motor de combustió són la culata que és la part superior i el bloc motor que és la part inferior.



La culata conté l'arbre de lleves, component que controla l'obertura i tancament de les vàlvules d'admissió i de fuga. Les primeres s'encarreguen del subministrament d'aire i de combustible a la càmera de combustió i les segones d'extraure els gasos produïts durant la combustió.

El bloc motor inclou el cigonyal, encarregat de transformar el moviment lineal que produeix el pistó en moviment rotatiu, i el carter, que és un dipòsit d'oli lubricant i que, mitjançant una bomba, lubricarà tots els components del motor per minimitzar els danys que es puguin produir per fricció. (11)

Aquest tipus de vehicles tenen un rendiment poc eficient i/o emeten emissions contaminats, seguidament s'explicaran breument les diferents opcions de vehicles de combustió segons el combustible que s'utilitza.

2.2.1. AUTOMÒBILS DE GASOLINA

Es caracteritzen per tenir un motor de gasolina també anomenat motor d'explosió. El combustible utilitzat és la gasolina.

La gasolina és una mescla d'hidrocarburs, octà i nonà, obtinguda del petroli per destil·lació fraccionada. Produeix una energia per volum de 9.700 Wh/l i una energia per massa de 12.200 Wh/kg (12).

El motor de gasolina té un rendiment d'un 20% a un 25% (13), el que significa que només la quarta part de l'energia calorífica es transforma en energia mecànica. Això es degut a que l'eficiència del motor va directament relacionada al grau de compressió del pistó i que, en aquest tipus de motors, és baixa per ser la gasolina un combustible tan volàtil.

El funcionament del motor és el següent: (14)

1. Admissió: Per la vàlvula d'admissió entra l'aire i el combustible .

2. Compressió: L'aire i el combustible barrejats són comprimits i, mitjançant la bugia, s'encén la mescla.

3. Combustió: El combustible detona i mou el pistó cap avall.

4. Fuita: Els gasos residuals de la combustió surten a través de la vàlvula de fuita.

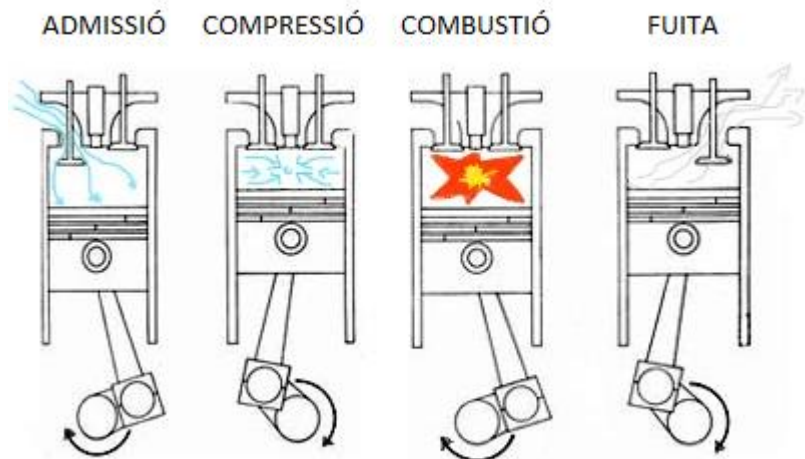


Figura 2. Pistó de quatre temps. Font: Pròpia



En comparació amb els demés vehicles de combustió interna, les principals avantatges i desavantatges que tenen els vehicles de gasolina són: (15)

Avantatges	Desavantatges
<ul style="list-style-type: none"> - Preu de venda més baix - Menys pes del vehicle - Major confort a l'hora de la conducció 	<ul style="list-style-type: none"> - Combustible més car - Major consum de combustible - Més emissions de CO₂

Taula 2. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gasolina. Font: Pròpia

2.2.2 AUTOMÒBIL DE GASOIL

Té un motor de gasoil també anomenat motor tèrmic i el combustible utilitzat és el gasoil.

El gasoil, com la gasolina, és una mescla d'hidrocarburs, majoritàriament de dodecà i, en menors quantitats, de decà a pentadecà, obtingut del petroli per destil·lació fraccionada i que genera una energia per volum de 10.700 Wh/l i una energia per massa de 12.700 Wh/kg (12).

El motor de gasoil té un rendiment del 40% (13), superior al de gasolina, donat a que hi ha major grau de compressió. És per aquest motiu que els materials emprats en la construcció dels motors de gasoil han de ser més resistents, el que els fa més pesats i més lents en comparació.



El funcionament és el següent: (16)

1. Admissió: Per la vàlvula d'admissió entra l'aire.
2. Compensió: L'aire és comprimeix fins a un punt on la temperatura arriba a 850°C (16). Al final d'aquesta fase, s'injectarà el combustible a gran pressió que s'inflamarà a causa de l'alta temperatura de l'aire.
3. Combustió: Mitjançant la combustió es produeixen uns gasos que mouen el pistó cap a baix.
4. Fuita: Els gasos residuals de la combustió surten a través de la vàlvula de fuita, igual que en el de gasolina.

En comparació als demés vehicles de combustió interna, les principals avantatges i desavantatges que tenen els vehicles de gasoil són: (15)

Avantatges	Desavantatges
<ul style="list-style-type: none">- Menor consum de combustible- Emet menys CO₂ respecte al de gasolina	<ul style="list-style-type: none">- Preu de venda més elevat- Més emissions de NO_x- Pes més elevat del vehicle

Taula 3. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gasoil. Font: Pròpia

2.2.3 AUTOMÒBIL DE GAS LIQUAT DEL PETROLI

Funcionen a partir d'un motor de gasolina al qual se li ha adaptat una alimentació de gas líquat. D'aquesta manera, funcionen tan amb gasolina com amb gas líquat, tot i que hi ha models que només funcionen amb gas líquat.



El gas líquat és la mescla d'hidrocarburs, propà i butà principalment, presents en el gas natural o dissolts en el petroli, que, a temperatura ambient està en estat gasós, però a pressió és fàcil tenir-lo en estat líquid. Produeix una energia per volum de 7.200 Wh/l i una energia per massa de 13.700 Wh/kg (12).

Utilitzant el gas líquat, el rendiment del motor és molt semblant al de gasolina, si bé, baixa una mica la potència, pràcticament no és apreciable. Per la resta, funciona de la mateixa manera. (15)

En comparació als demás vehicles de combustió interna, les principals avantatges i desavantatges que tenen els vehicles de gas líquat de petroli són: (15)

Avantatges	Desavantatges
<ul style="list-style-type: none"> - Combustible més barat - Menys emissions contaminants - Major durabilitat del motor - Possible utilització de gasolina - Instal·lació que es pot realitzar a la majoria dels cotxes de gasolina 	<ul style="list-style-type: none"> - Preu de venda més elevat, però menys que els de gas natural - Petita pèrdua de prestacions (potència) - Poques estacions per repostar, però més que els de gas natural

Taula 4. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gas líquat del petroli. Font: Pròpia

2.2.4 AUTOMÒBIL DE GAS NATURAL COMPRIMIT

Funciona exactament com els de gas líquat mitjançant un motor de gasolina, però no utilitza gas líquat sinó gas natural.

El gas natural és una mescla d'hidrocarburs d'origen natural compost majoritàriament per metà i, en menors quantitats, per età, propà, butà i poques quantitats de hidrogen. A 250 bars genera una energia per volum de 3.100 Wh/l i una energia per massa de 12.100 Wh/kg (12).



El rendiment és més alt que utilitzant gasolina, donat que té un major grau de compressió.

En comparació als demés vehicles de combustió interna, les principals avantatges i desavantatges que tenen els vehicles de gas natural comprimit són: (15)

Avantatges	Desavantatges
<ul style="list-style-type: none"> - Combustible més barat - Menor consum de combustible - Menys emissions - Major durabilitat del motor - Possible utilització de gasolina - Instal·lació que es pot realitzar a la majoria dels cotxes de gasolina 	<ul style="list-style-type: none"> - Preu de venda més elevat - Poques estacions per repostar

Taula 5. Avantatges i desavantatges dels automòbils de gas natural comprimit. Font: Pròpia

2.2.5. AUTOMÒBIL DE COMBUSTIÓ INTERNA DE BIOGÀS

També utilitza un motor de gasolina, però biogàs com a combustible.

El biogàs és una mescla de gasos amb dos components principals, metà i diòxid de carboni, que es genera mitjançant la fermentació de la matèria orgànica a partir de l'acció d'uns microorganismes anaeròbics (microorganismes que treballen amb absència d'aire) (17). El biogàs produeix una energia per volum de 4.600 Wh/l i una energia per massa de 6.400 Wh/kg (12).

El biogàs i el gas natural comprimit, com que estan formats majoritàriament per metà, en tots dos vehicles es poden utilitzar tan un combustible com l'altre.

La part positiva d'aquest combustible es que recicla desfets i brossa, disminuint la grandària d'aquests. Les principals fonts del biogàs són:

- Residus i/o deixalles de la ramaderia.
- Residus vegetals
- Residus domèstics orgànics

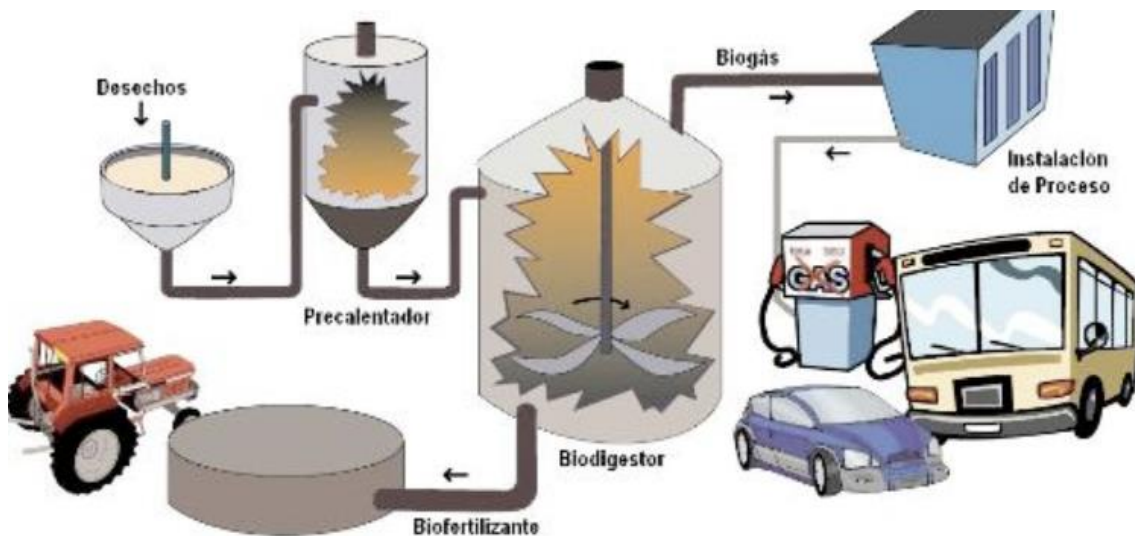


Figura 3. Cicle del combustible de biogàs. Font: (18)

En comparació als demés vehicles de combustió interna, les principals avantatges i desavantatges que tenen els vehicles de combustió interna de biogàs són:

Avantatges	Desavantatges
<ul style="list-style-type: none"> - Combustible més barat - Menor consum de combustible - Menys emissions - Reducció de les emissions de metà dels materials orgànics - S'extreuen fertilitzants a partir de l'elaboració del combustible 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de producció del combustible car

Taula 6. Avantatges i desavantatges automòbils de biogàs. Font: Pròpia



2.2.6. AUTOMÒBIL DE COMBUSTIÓ INTERNA D'HIDROGEN

La següent alternativa funciona a partir d'un motor de combustió alimentat per hidrogen, que funciona de la mateixa manera que el de gasolina.

L'hidrogen, com s'explicarà més endavant, és un combustible que requereix molta energia per sintetitzar-lo. El fet de que els motors de combustió tinguin un rendiment baix fa que es malgasti molt combustible, fent que no sigui una bona alternativa davant de l'automòbil elèctric de pila d'hidrogen, ja que tindran pitjor autonomia i major consum de combustible.

En comparació als demés vehicles de combustió interna, les principals avantatges i desavantatges que tenen els vehicles de combustió interna d'hidrogen són:

Avantatges	Desavantatges
<ul style="list-style-type: none">- Zero emissions de CO₂.	<ul style="list-style-type: none">- Preu de venda molt elevat- Baixa autonomia

Taula 7. Avantatges i desavantatges automòbils de combustió interna d'hidrogen. Font: Pròpia

2.3. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC

Un automòbil elèctric és un vehicle que es desplaça a partir de l'acció d'un o més motors elèctrics alimentats per l'energia elèctrica que s'emmagatzema en les bateries. Respecte als de combustió, els motors elèctrics es caracteritzen per tenir un sol interval de velocitat i, així, una acceleració continuada. També, al no haver-hi tantes pèrdues de calor són fins a tres vegades més eficients energèticament que un motor de combustió interna (19).

El funcionament d'un vehicle elèctric comença a partir dels valors dels senyals d'entrada provinents dels pedals de fre i d'acceleració. Aquesta senyal és conduïda al controlador del vehicle, que processa la informació per donar una sortida que reguli el flux de potència entre el motor elèctric i les bateries, per tal d'aconseguir una resposta adequada del motor. Entre la bateria i el controlador del vehicle es troba un inversor DC-AC, que s'encarrega de transformar la corrent continua de les bateries en corrent alterna.

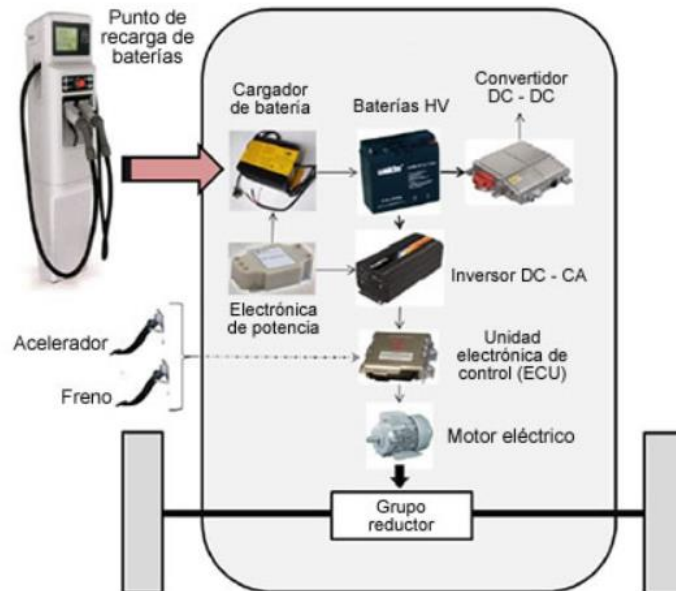


Figura 4. Circuit elèctric d'un vehicle elèctric. Font: (20)



Els vehicles elèctrics acostumen a disposar d'un sistema de frenada regenerativa, encarregat de recuperar l'energia cinètica malgastada en una frenada o en una baixada, per recarregar les bateries. Com es pot veure en la *Figura 5*, el fre regeneratiu consisteix en un motor elèctric que genera energia elèctrica.



Figura 5. Components d'un fre regeneratiu. Font: (20)

El motor elèctric és una màquina que converteix l'energia elèctrica en energia mecànica mitjançant camps magnètics que es generen en les bobines. El motor està compost principalment per una part fixa, l'estator, i una part mòbil, el rotor.

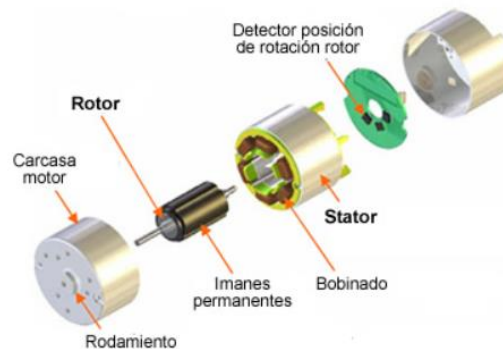


Figura 6. Components d'un motor elèctric. Font: (20)

La transformació de l'energia elèctrica en energia mecànica es fa mitjançant l'acció de camps magnètics generats en les bobines de l'estator i del rotor. Amb l'energia procedent de l'electricitat es crearan, en el estator, uns camps magnètics oposats entre si que faran que es mogui la part giratòria del motor, el rotor. Dins del rotor hi ha una bobina que, degut a la presència de l'electricitat, crearà també un camp magnètic, però oposat al de l'estator. Aquesta acció repel·lent és el motiu pel qual gira, produint així l'energia mecànica. (21)

El motor dels vehicles elèctrics consta de tres parts: (22)

- Carregador embarcat: La seva funció és transformar el corrent altern procedent d'un punt de recàrrega en corrent continu, per emmagatzemar l'energia en la bateria.
- Convertidor: Quan el vehicle es troba en acceleració, el convertidor transforma el corrent continu de la bateria en corrent altern per al motor i, quan el vehicle es troba en desacceleració, el motor ofereix una resistència que converteix l'energia cinètica en corrent altern, fent que el convertidor transformi aquest corrent altern en continu, per així emmagatzemar-lo en les bateries. A més, serà responsable d'oferir la quantitat d'energia exacte al motor en funció de les necessitats del vehicle/conductor.
- Motor elèctric: El motor té dos funcions, en accelerar, convertir l'energia elèctrica en energia cinètica i, en desaccelerar, transformar l'energia cinètica en energia elèctrica.



Figura 7. Components d'un motor elèctric d'un vehicle. Font: (22)

Aquests motors tenen un rendiment energètic del 70-80% (13), mentre que els de combustió interna un 25-40%. Combinat amb d'altres mètodes de recuperació energètica, el vehicle pot arribar a un rendiment de fins al 90%.

Com alternatives de vehicles elèctrics es veuran dos, que s'exposen a continuació.



2.3.1. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC RECARREGABLE

Els vehicles es caracteritzaran per l'ús de bateries recarregables com a font d'energia.

La importància de les bateries en aquest cas és tan alta que influirà amb gran mesura en relació a l'autonomia i el preu del cotxe depenent del tipus i grandària d'aquestes. Les bateries emmagatzemen l'electricitat a partir d'elements electroquímics, oferint un sistema amb un rendiment molt elevat en relació a pèrdues elèctriques. Però un dels seus inconvenients és el seu nombre finit de cicles de càrrega i descàrrega.

El funcionament de les bateries consisteix en reaccions químiques d'oxidació-reducció per produir un corrent elèctric, això quant a la descàrrega. En canvi, la càrrega utilitza el corrent elèctric per produir un canvi químic en els elements de la bateria.

La reacció d'oxidació-reducció, anomenada també reacció redox, consisteix en un intercanvi d'electrons en el qual un element s'oxida i, per tant, perd electrons i l'altre element es redueix guanyant electrons. Respectivament, el primer element s'anomena ànode i el segon càtode, i aquests dos són submergits en un electròlit. La reacció d'oxidació-reducció coneguda com a "redox" és un procés on un dels components de la bateria perd electrons i l'altre els guanya, un s'oxida i un altre es redueix respectivament. Una bateria està formada per dos elèctrodes anomenats ànode i càtode submergits en un electròlit, que és una substància que condueix els electrons mitjançant el seu medi. Pel que fa al procés de càrrega, els electrons guanyats pel càtode tornen al ànode per així poder repetir el cicle inicial. (23)



Els aspectes més importants de les bateries dels vehicles elèctrics són els següents: (24)

- Densitat energètica: És la capacitat que té la bateria d'emmagatzemar energia, d'aquest aspecte dependrà l'autonomia del vehicle. Es mesura en watts per hora entre kilogram (Wh/kg).
- Capacitat de la bateria: És la velocitat a la qual pot subministrar o acceptar ampers, d'aquest paràmetre dependrà el temps de càrrega de la bateria. Es mesura en watts partit hora (W/h) i en ampers per hora (Ah).
- Potència: És la capacitat que té el procés de descàrrega en proporcionar potència. Les prestacions del vehicle dependran d'aquest aspecte. Es mesura en watts partit quilogram (W/kg).
- Eficiència: És la capacitat de minimitzar les pèrdues energètiques de la bateria. Es mesura en percentatge (%).
- Cicle de vida: Són la quantitat de cicles de càrrega i descàrrega d'una bateria. D'aquest aspecte depèn la vida útil.

Un cop s'han analitzat els diferents aspectes es pot fer un anàlisi comparatiu de les diferents bateries que presenta el mercat per als vehicles elèctrics.

TIPUS DE BATERIES			
TIPUS DE BATERIA	AVANTATGES	DESAVANTATGES	CARACTERÍSTIQUES
PLOM-ÀCID (Pb-àcid)	Baix cost Bona resposta en fred	Són pesades El plom és tòxic Capacitat de recàrrega lenta	Cicle de vida: Entre 500 i 800 cicles de càrrega i descàrrega Densitat energètica: Entre 30-40 Wh/kg Necessitat de manteniment periòdic
NÍQUEL-CADMI (NiCd)	Major fiabilitat Existeixen tècniques de reciclatge total de les bateries	Alt cost Perden densitat energètica al llarg de la seva vida útil Envel·liment prematur per la calor Contaminants	Cicle de vida: Entre 1.500 i 2.000 cicles de càrrega i descàrrega Densitat energètica: Entre 40-60 Wh/kg Necessitat de manteniment periòdic
NÍQUEL-HIDRUR METÀL·LIC (NiMH)	No perden gaire densitat energètica No contenen cadmi	Menys fiabilitat Poca resistència a altes temperatures	Cicle de vida: Entre 300 i 500 cicles de càrrega i descàrrega Densitat energètica: Entre 30-80 Wh/kg Elevat manteniment
IÓ-LITI (LiCoO₂)	Alta densitat energètica Menor grandària i pes Alta eficiència No perden densitat energètica	Alt cost de producció Fragilitat Poc segures, necessiten sistemes de seguretat Precisen emmagatzematge delicat.	Cicle de vida: Entre 400 i 1200 cicles de càrrega i descàrrega Densitat energètica: Entre 100-250 Wh/kg No requereixen manteniment
IÓ-LITI AMB CÀTODE (LiFePO₄)	Més seguretat Més estabilitat Més potència	Menor densitat energètica Major cost	Cicle de vida: 2.000 cicles de càrrega i descàrrega Densitat energètica: Entre 90-100 Wh/kg No requereixen manteniment
Polímer de liti (LiPo)	Més lleugeres Més eficients	Alt preu Cicle de vida curt	Cicle de vida: Per sota de 1.000 cicles de càrrega i descàrrega Densitat energètica: 300 Wh/kg No requereixen manteniment

Taula 8. Tipus de bateries. Font: (24)

Les bateries d'ió-liti són en les que més s'està invertint actualment, ja que és una tecnologia molt recent i es troba en continu desenvolupament, donant un gran marge de millora per aconseguir autonomies més amples en els vehicles i un menor temps de càrrega. L'eficiència d'aquestes és del 90%.

Els vehicles elèctrics recarregables són una molt bona alternativa a tenir en compte en un futur, malgrat que encara s'haurà d'investigar i desenvolupar la tecnologia que utilitzen les bateries, donat que les utilitzades actualment presenten molts inconvenients. Tot i així, aquesta alternativa es tindrà en compte al llarg de l'estudi.



2.3.2. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN

A diferència de l'anterior, la seva font d'energia prové de la pila d'hidrogen. Aquesta, com el seu nom indica és una pila, no deixa de ser una bateria, però, en aquest cas, els reactius que es consumeixen es van renovant contínuament. Els reactius són dos, l'hidrogen que actuarà com ànode i l'oxigen com a càtode i, al barrejar-los, es produirà un procés electroquímic generant energia i aigua com a producte.

A continuació, l'energia produïda s'emmagatzemarà en una bateria i, des d'aquí, s'enviarà al motor.

En l'apartat 3. *AUTOMÒBIL ELÈCTRIC DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN* es donarà una informació detallada d'aquest tipus d'alternativa, que és el tema principal d'aquest estudi.

2.4. AUTOMÒBIL HÍBRID

L'automòbil híbrid combina un motor de combustió interna amb un o varis motors elèctrics. Hi ha de tres tipus: (25)

- Híbrid en sèrie: Consisteix en un cotxe elèctric que conté un motor de combustió interna i que fa de generador d'electricitat, per tal de recarregar la bateria i així ampliar l'autonomia del vehicle.
- Híbrid en paral·lel: El motor de combustió i l'elèctric donen força a la transmissió simultàniament.
- Híbrid combinat: És una combinació dels dos anteriors, es tracta d'un híbrid en sèrie però el motor de combustió està connectat a la transmissió.

Amb el sistema híbrid s'aconsegueix que la utilització del motor elèctric aporti major eficiència energètica al motor de combustió, ja que s'utilitzen sistemes de reutilització d'energia com és el cas dels frens regeneratius. (25)

Les principals avantatges i desavantatges que tenen els vehicles híbrids són:

Avantatges	Desavantatges
<ul style="list-style-type: none"> - Major eficiència energètica pel motor de combustió - Menor consum de combustible per ciutat 	<ul style="list-style-type: none"> - Preu de venda més elevat - Pes més elevat del vehicle - Consum per carretera semblant al del vehicle de gasolina

Taula 9. Avantatges i desavantatges d'un automòbil híbrid. Font: Pròpia

2.5. COMPARACIÓ

En la següent taula s'exposa els avantatges i desavantatges dels vehicles de combustió interna i els elèctrics:

VEHICLES DE COMBUSTIÓ INTERNA	VEHICLES ELÈCTRICS
AVANTATGES	
<p>Major autonomia</p> <p>Menor temps de càrrega del dipòsit de combustible (especialment comparat amb els V.E. Recarregables)</p> <p>Cost de producció més reduït (ja que porten molts anys al mercat)</p> <p>Major velocitat màxima</p>	<p>Major eficiència energètica</p> <p>No emet emissions contaminants</p> <p>No depèn d'energies limitades</p> <p>Mecànica del vehicle més simple (no té circuit de refrigeració, ni caixa de canvis i el motor és més simple)</p> <p>Menor manteniment</p> <p>Major confort de conducció</p> <p>Major acceleració a l'arrencar</p>
DESAVANTATGES	
<p>Menor eficiència energètica</p> <p>Emeten emissions contaminants</p> <p>Depèn d'energies limitades (excepte el cas dels vehicles de biogàs)</p>	<p>Dificultat per aconseguir llargues autonomies</p> <p>Tecnologia no suficientment evolucionada</p> <p>Actualment poca viabilitat a gran escala</p> <p>Impacte mediambiental a gran escala poc estudiat</p> <p>Cost de producció actualment alt</p>

Taula 10. Avantatges i desavantatges entre un automòbil de combustió interna i un elèctric. Font: Pròpia



Un cop s'han exposat les diferents alternatives actuals, es pot arribar a la conclusió de que els vehicles elèctrics són millor opció que els de combustió interna, si bé, encara han d'evolucionar.

Per a poder fer ús a gran escala dels vehicles elèctrics, s'haurà de millorar l'autonomia, satisfer la demanda energètica que requerirà, reduir els costos d'adquisició en comparació als dels vehicles de combustió i, sobretot, fer un estudi per veure l'impacte mediambiental que causarà, vol dir, si a nivell global hauran suficients materials per fer una producció massiva i avaluar els residus que generarà, especialment amb les bateries utilitzades dels vehicles elèctrics recarregables.

A curt termini, la millor opció sembla que apunta cap als vehicles de combustió interna de gas natural comprimit i als de biogàs. Aquests, modificant qualsevol vehicle de gasolina mitjançant la instal·lació d'un depòsit secundari de gas natural o biogàs i calibrant adequadament l'alimentació del motor, podran utilitzar sense cap problema gasolina, gas natural i biogàs, i reduir la contaminació mediambiental, especialment els de biogàs. Aquests últims, a més, redueixen les emissions de metà dels residus comentats en el seu apartat, convertint-los en diòxid de carboni, un gas molt més inofensiu quant l'escalfament global.

Els vehicles híbrids que utilitzen també aquest combustible no deixen de ser bona opció, sempre i quan s'ajustin a les necessitats del propietari, ja que són vehicles molt ben dissenyats per aprofitar les seves prestacions en ciutat, però no tant en carretera.

L'opció dels vehicles de combustió interna de gas natural comprimit/biogàs serà un pas intermedi a l'alternativa del futur, els vehicles elèctrics, els recarregables i els de pila d'hidrogen. A partir d'ara, es realitzarà un estudi complert d'aquests últims per veure la seva viabilitat, sent l'alternativa principal d'anàlisi en aquest treball.

3. AUTOMÒBIL ELÈCTRIC DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN

Els automòbils elèctrics de pila de combustible d'hidrogen sorgeixen com una alternativa a tots els vehicles que utilitzen combustibles fòssils, amb l'objectiu de reduir les emissions contaminants i deixar de dependre d'energies limitades. El seu principal competidor, també ecològic, és el vehicle elèctric recarregable, que serà anomenat en diverses ocasions.

3.1. HISTÒRIA DE L'EVOLUCIÓ DELS VEHICLES ELÈCTRICS DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN

L'alternativa dels vehicles elèctrics amb pila de combustible d'hidrogen es remunta al segle XIX amb el sorgiment dels primers vehicles elèctrics recarregables.

Tot comença a l'any 1828, quan l'hongarès Ányos Jedlik inventa el motor elèctric i crea un petit vehicle sustentat per aquest motor. Més endavant, al 1835, el professor Sibrandus Stratingh, als Països Baixos, crea un cotxe elèctric a petita escala alimentat per bateries no recarregables.

Al 1859, amb la invenció de la bateria de plom-àcid del físic francès Gaston Planté, és quan es comença a potenciar l'automoció elèctrica, donat que aquestes bateries tenien la capacitat de recarregar-se facilitant un medi viable per l'emmagatzematge d'electricitat en el vehicle. Seria al 1881, quan Camille Alphonse Faure, un altre científic francès, millora significativament el disseny de la bateria permetent la fabricació d'automòbils a escala industrial.

Al 1863 sorgeix el motor de combustió interna, construït pel francès Etienne Lenoir, però no seria fins al 1876 quan Nikolaus Otto el millorés notablement.

L'inventor anglès Thomas Parker, responsable d'innovacions com les d'electrificar el metro de Londres i les línies de tramvies en Liverpool i Birmingham, va realitzar la primera producció de cotxes elèctrics a Londres al 1884.

Al 1899, es registra un nou rècord de velocitat feta per un vehicle elèctric, anomenat Jamais Contente, que arriba als 105,88 km/h.

L'interès pels vehicles elèctrics va augmentar considerablement a la dècada de 1890 i principis de 1900. A finals del segle XIX, existia una flota de taxis elèctrics circulant per Londres.

Figura 8. Thomas Edison amb un vehicle elèctric. Font: (26)



L'acceptació dels cotxes elèctrics va ser obstaculitzada per la falta d'infraestructura per a la càrrega i descàrrega d'energia, si bé, al 1912, moltes cases estaven dotades amb subministrament d'electricitat, el que va permetre un augment de la seva popularitat. També, van sorgir serveis per superar el rang limitat d'operació d'aquests vehicles i a la falta d'infraestructura de recàrrega, que consistien en un servei de bateries intercanviables, proposat al 1896 per primera vegada. El propietari del vehicle comprava el vehicle a General Vehicle Company sense la bateria i l'electricitat era adquirida a Hatford Electric a través d'una bateria intercanviable. Així, podia anar a llocs on l'autonomia del vehicle no ho fes possible, ja que durant el trajecte podia trobar punts per "repostar electricitat", mitjançant el canvi de bateria que es realitzava ràpidament. El servei va ser pensat especialment per a camions elèctrics.



Al començament del segle XX, el 40% dels automòbils eren impulsats a vapor, el 38% elèctrics i el 22% de gasolina.

Durant la dècada de 1910, es van descobrir a tot el món grans reserves de petroli, fent que els vehicles que utilitzaven combustibles derivats del petroli fossin més econòmics. També, les limitacions dels cotxes elèctrics quant a velocitat i autonomia (tenien velocitats màximes entre 24 a 32 km/h i autonomies entre 50 a 65 km) van fer que quedessin enrere, donat que els de gasolina eren capaços de viatjar més lluny i més ràpid. (27)

Finalment, l'inici de la producció en cadena de vehicles propulsats per gasolina de Henry Ford va reduir dràsticament el seu preu, fent-los el doble d'econòmics que els elèctrics, traient del mercat, durant la dècada de 1910 a 1920, a tots els fabricants de vehicles elèctrics.

Al 1966, *General Motors* fabrica el primer vehicle elèctric amb pila de combustible d'hidrogen. Aquest era una furgoneta on, en el seu interior, albergava dos tancs de gas, un d'hidrogen líquid i l'altre d'oxigen líquid, que al combinar-se generava electricitat que alimentava les seves bateries i aquestes al motor elèctric. Aquest vehicle agafava una velocitat màxima de 100 km/h i tenia una autonomia de 200 km. (28)

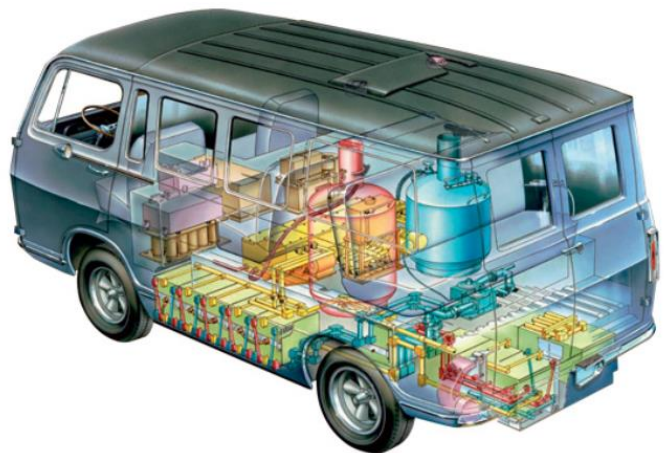


Figura 9. Primer vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen Font: (28)

Durant la dècada de 1970, *General Electric* va seguir investigant sobre els vehicles elèctrics d'hidrogen, si bé, en aquella època, la pila d'hidrogen només es va utilitzar en aplicacions espacials, incloent el transbordador espacial.



No seria fins la dècada de 1990, quan diferents multinacionals automobilístiques invertissin amb major magnitud a la recerca i al desenvolupament d'alternatives respectuoses amb el medi ambient. Al 2001, van sortir els primers prototips de cotxes utilitaris i, al 2008, el primer vehicle elèctric de pila d'hidrogen al mercat, l'Honda FCX Clarity. (27)

Actualment les tres grans empreses que aposten per els vehicles elèctrics de pila d'hidrogen són Toyota, Hyundai i Honda.

3.2. ESTUDI DEL FUNCIONAMENT

S'ha de tenir present els conceptes referents als vehicles elèctrics explicats a l'apartat 2.3. *AUTÒMOBILS ELÈCTRICS*, per a una millor comprensió de lo que s'explicarà a continuació.

Com s'ha explicat anteriorment, els vehicles elèctrics de pila d'hidrogen no deixen de ser un vehicle elèctric, que extrau l'energia elèctrica del component que s'anomena pila d'hidrogen, que no deixa de ser una bateria, però, en aquest cas, els reactius que es consumeixen es van renovant contínuament, a diferència dels vehicles elèctrics recarregables.

A continuació, s'expliquen els diferents components que componen aquest vehicle:

- **Motor elèctric:** Serà l'encarregat de transformar l'energia elèctrica en mecànica, mitjançant l'acció de camps magnètics. Aquest estarà format per la unitat electrònica, el carregador embarcat, el convertidor, el motor elèctric i l'engrenatge reductor (la transmissió). (Explicat àmpliament els motors elèctrics en l'apartat 2.3. *AUTOMÒBILS ELÈCTRICS*).
- **Bateria:** Ens servirà per emmagatzemar energia elèctrica, a fi de que, quan la demanda energètica del vehicle sigui més alta que la que crea la pila d'hidrogen, es pugui subministrar al motor, però també per tenir un funcionament suau i constant del propi vehicle. Normalment s'utilitzarà la de ions de liti, donat que té bona densitat energètica, gran potència, gran eficiència i poca grandària i pes (Explicat àmpliament els tipus de bateries en l'apartat 2.3.1. *A.E. RECARREGABLE*). Cal destacar que la bateria dels V.E. de pila d'hidrogen tindrà molta menys densitat energètica que la dels V.E. Recarregables, i per tant seran molt més petites.

- **Tancs d'hidrogen:** Seran els encarregats d'emmagatzemar el combustible d'hidrogen. Normalment cilíndrics i de fibra de carboni i altres materials compostos que siguin molt resistents, sobretot, perquè l'hidrogen que s'emmagatzema es comprimeix a molt alta pressió, fins a 700 bars de pressió. El tanc ocupa molt de volum, per exemple, el de l'Honda FCX Clarity és de 171 litres de capacitat. (S'explica àmpliament en l'apartat 5. *EMMAGATZEMATGE I TRANSPORT DE L'HIDROGEN*).
- **Pila de combustible:** És el component característic d'aquests vehicles i és l'encarregat de produir electricitat a partir d'una reacció electroquímica entre l'hidrogen que actuarà com ànode i l'oxigen com a càtode, donant-nos aigua com a residu. El oxigen introduït en la pila, provindrà de l'aire exterior, per aquest motiu serà important filtrar-lo molt bé i comprimir-lo, cosa que ens farà consumir energia. El rendiment de la pila és del 60% (29).

Resumint, el funcionament global consistirà en que el combustible guardat en els diversos tancs anirà a la pila de combustible d'hidrogen, en la que, juntament amb l'aire extret del exterior, s'aconseguirà energia i aigua com a residu. Un cop aconseguida l'energia elèctrica, serà emmagatzemada en la bateria, on, en funció de la demanda energètica que requereixi el motor, l'alimentarà proporcionant-li energia cinètica a partir d'energia elèctrica.

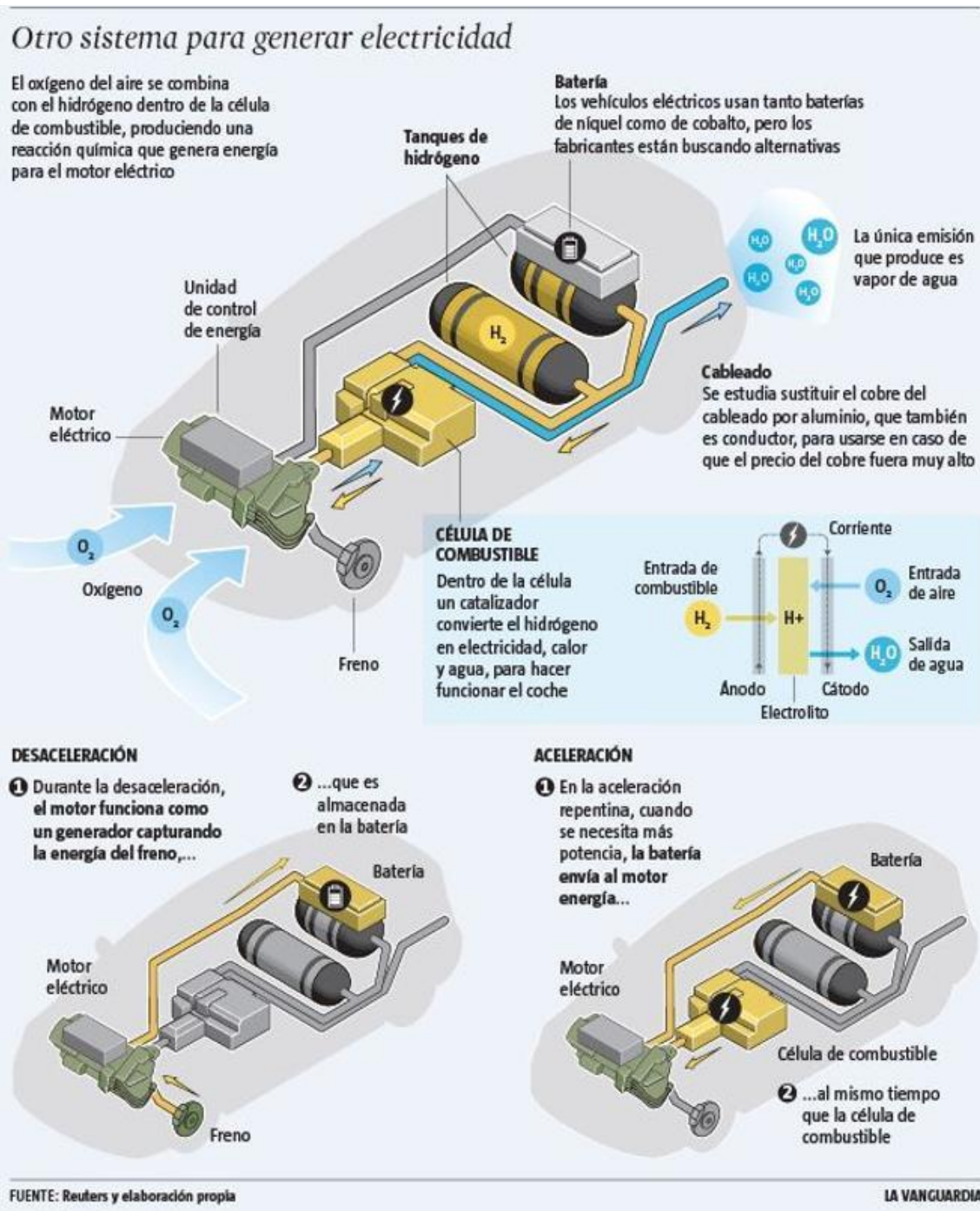
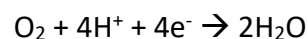
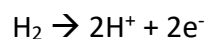


Figura 10. Esquema del funcionament d'un vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen. Font: (30)

Com es pot veure, el component més característic d'aquesta alternativa és la pila d'hidrogen, donat que els altres elements no deixen de ser els mateixos que els del vehicle elèctric. Per aquest motiu, a continuació es farà una descripció de la pila.

La pila d'hidrogen està constituïda per més de 300 cèl·lules (31). El nucli de cada cèl·lula la forma una membrana de polímer on, en cada costat, té una base de platí que actuarà com a catalitzador.

L'hidrogen es subministrat a l'ànode de pila, on després d'oxidar-se, els protons i els electrons es desplacen cap al càtode a través de les diferents membranes, on reaccionen amb l'oxigen produint aigua com a residu. Al mateix temps, els electrons subministren energia elèctrica a l'exterior de la bateria produint un voltatge per cada cèl·lula entre 0,6 i 0,8 volts i donant un voltatge total de la pila de 230 a 360 volts (31).



Un dels components secundaris més important de la pila és el turbocompressor que fa dos funcions, la primera és subministrar l'aire a les cèl·lules i la segona és retornar l'hidrogen no utilitzat a l'ànode. En aquest últim procés, serà necessari baixar la temperatura de la pila i, per aquest motiu, haurà de disposar d'un sistema de refrigeració. (31)

Tots dos components secundaris, utilitzen l'energia elèctrica subministrada per la pròpia pila, que és un dels motius pel qual l'eficiència de la pila no és del 100%.

La pila té un rendiment entorn del 60%, però podria arribar a un 90% si s'aprofités el calor residual (29). A continuació per fer els càlculs de rendiments del vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen es partirà d'un cas favorable en el que la pila de combustible tingui un rendiment del 70%.

Com s'ha pogut veure al llarg de l'estudi, els rendiments dels diferents components dels vehicles elèctrics són:

- Motor elèctric amb frens regeneratius → 90%
- Controlador → 95%
- Bateria d'Ió de Liti → 90%
- Pila d'hidrogen → 70%
- Carregador vehicle elèctric → 90%
- Cables i convertidor del vehicle elèctric → 95%



En els vehicles elèctrics de pila d'hidrogen, l'energia produïda per aquesta anirà a la bateria d'Ió de Liti, d'aquí al convertidor DC-AC, a continuació al controlador i finalment al motor, donant una eficiència global del vehicle de:

$$\text{Rendiment V.E. de pila d'hidrogen} = 0,90 \times 0,95 \times 0,90 \times 0,70 \times 0,95 = 0,51$$

El V.E. de pila d'hidrogen té un rendiment total del 51% de tota l'energia que s'extrau de l'hidrogen. A l'apartat 6.1. *ESTUDI ENERGÈTIC* es farà una descripció de l'eficiència energètica de tot el procés, vol dir, l'energia necessària per sintetitzar l'hidrogen i el seu aprofitament en el vehicle.

En canvi, en els vehicles elèctrics recarregables, l'energia serà recarregada a la bateria, d'aquí a un convertidor DC-AC, a continuació al controlador i finalment al motor, donant una eficiència global del vehicle de:

$$\text{Rendiment V.E. Recarregable} = 0,90 \times 0,95 \times 0,90 \times 0,95 = 0,73$$

El V.E. Recarregable té un rendiment total del 73% de tota l'energia elèctrica subministrada per la xarxa elèctrica. Per realitzar una millor comparació amb el V.E de pila d'hidrogen, en el apartat 6.1 *ESTUDI ENERGÈTIC* es tindran en compte les pèrdues elèctriques donades pel transport d'electricitat.

Com s'ha pogut observar en el estudi de l'eficiència de tots dos vehicles, el recarregable té millor rendiment elèctric respecte al d'hidrogen.



3.3. REPTES TECNOLÒGICS

El vehicle elèctric de pila d'hidrogen és una alternativa molt recent en comparació als vehicles de combustió i als elèctrics recarregables, per aquest motiu, encara té una eficiència energètica global baixa en el conjunt del procés, comptant des de l'exigència energètica per elaborar el combustible fins la del vehicle per aconseguir l'energia cinètica per desplaçar-se.

Actualment, com es veurà en el apartat *6.1 ESTUDI ENERGÈTIC*, el rendiment global de tot el procés energètic d'un vehicle elèctric recarregable és més del doble d'eficient que el d'un d'hidrogen. És cert que, pel fet d'haver-hi més transformacions energètiques, el rendiment global d'un vehicle d'hidrogen mai arribarà al del recarregable, però obtenir un rendiment global energèticament competitiu respecte al recarregable serà un dels reptes més importants en un futur.

Un altre aspecte important serà reduir els costos d'adquisició del vehicle, perquè actualment aquests vehicles són molt cars.

A continuació, es citaran una sèrie de reptes tecnològics per millorar la competitivitat del vehicle elèctric de pila d'hidrogen:

- **Millorar l'eficiència del vehicle:** Com s'ha comentat anteriorment, les piles d'hidrogen actuals tenen un rendiment entorn del 60%, però si s'aprofités la calor residual que generen podrien arribar a rendiments del 90%. Al ser aquestes el component menys eficient, seria crucial la seva millora per tal d'augmentar el rendiment del vehicle.
- **Millorar el preu d'adquisició:** Actualment, el preu més econòmic d'aquests vehicles és d'uns 60.000€, el que es degut principalment a que la producció dels vehicles no és fa en cadena, al ser baixa la demanda, a l'alt preu de les piles de combustible d'hidrogen, que utilitzen metalls costosos com el platí o el pal·ladi, i al cost dels dipòsits d'hidrogen, que fan servir grans quantitats de fibres de carboni i de vidre. Per aquesta raó, s'està investigant en la creació de piles minimitzant l'ús dels metalls comentats.

- **Vida útil de la pila de combustible:** S'ha demostrat que les piles més actuals tenen entorn d'unes 5.000 hores de vida útil (32), el que en quilometres representa uns 250.000 km a una velocitat mitjana de 50 km/h. En els darrers anys aquest aspecte ha millorat molt, ja que al 2009 eren de 2.500 hores. Tot i així, al ser el component més costós del vehicle, com més duri la pila major serà la vida útil del vehicle.
- **Millorar el preu del combustible:** En països com Alemanya, el preu del combustible és d'uns 8,00€ el quilogram d'hidrogen (33). Generalment aquests vehicles consumeixen entorn 0,9 kg als 100 km, per tan, tenen un consum de 7,20€ cada 100 km, mentre que en un vehicle elèctric surt aproximadament a 3,20€ els 100 km. Serà important millorar el preu del combustible si es vol competir amb l'elèctric recarregable.
- **Estacions per repostar:** Al 2018 hi havia al món 369 estacions de les anomenades hidrogenaries, 152 en Europa, de les quals, 62 són alemanyes i 6 espanyoles, 136 a Àsia, 78 a Nord-Amèrica, 2 a Sud-Amèrica i 1 a Oceania (34). Si en un futur es vol donar viabilitat a aquesta alternativa, s'haurà d'invertir en la construcció de noves estacions. El problema és que la construcció d'una hidrogenaria té un cost molt elevat (entre 500.000 i 700.000 € per un sortidor amb dues manegues) en comparació a una gasolinera.

Resumint, si l'alternativa dels vehicles elèctrics de pila d'hidrogen vol competir amb els vehicles elèctrics recarregables, serà important millorar el seu rendiment global i abaratir els costos d'adquisició dels vehicles i del combustible.



4. PRODUCCIÓ DE L'HIDROGEN

En l'actualitat, el 96% de l'hidrogen produït prové de combustibles fòssils, degut a que són les pròpies empreses del sector les que consumeixen el 95% del total de l'hidrogen produït (35). Tot i així, existeixen que utilitzen fonts renovables per a la seva producció, que consisteixen en fer servir l'aigua o la biomassa com a matèria prima.

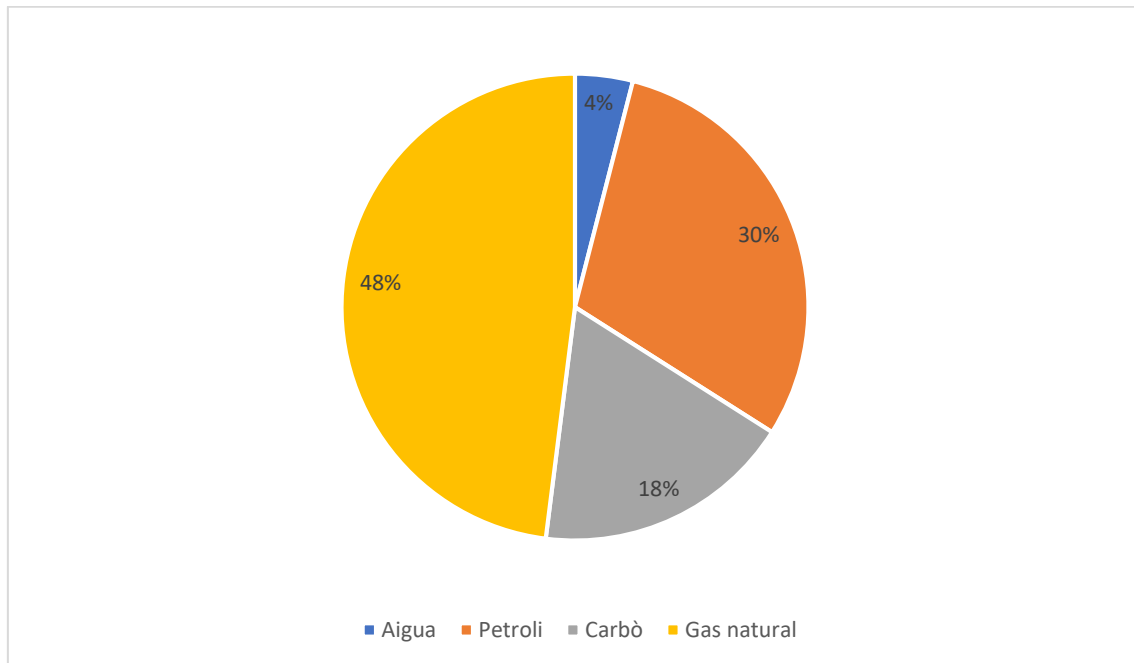


Figura 11 . Origen de l'hidrogen produït. Font: (35)

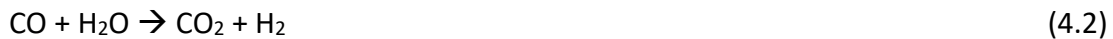
4.1. PRODUCCIÓ D'HIDROGEN A PARTIR DE COMBUSTIBLES FÒSSILS

La producció a partir de combustibles fòssils ens ofereix poder obtenir l'hidrogen de la manera més econòmica, donat que el procés no requereix tanta energia com d'altres mètodes que es veuran més endavant. El gran inconvenient és que, al produir-se a partir d'aquests combustibles, emetrà gasos contaminants com el diòxid de carboni i dependrà de fonts limitades.

Hi ha tres tipus de producció de l'hidrogen a partir dels combustibles fòssils, el reformat d'hidrocarburs, l'oxidació parcial dels hidrocarburs i la gasificació.

4.1.1. REFORMAT D'HIDROCARBURS

En aquest procés, s'utilitzaran hidrocarburs procedents del petroli o del gas natural que intervindran en una reacció catalítica de la següent manera:



En el cas d'utilitzar el gas natural com a font d'hidrocarburs de metà, es produirà la següent reacció:



El reformat d'hidrocarburs consta de tres parts:

- La primera etapa consisteix en el reformat del metà, reacció (4.3). Al ser una reacció endotèrmica es treballa a 900°C i, al fer-lo a temperatures tan altes, s'utilitzarà part de l'hidrocarbur com a font d'energia. Un cop ha reaccionat el metà i l'aigua, s'aconsegueix l'hidrogen i el monòxid de carboni.
- En la segona etapa, el monòxid de carboni procedent de la primera etapa reacciona amb aigua, reacció (4.4), donant així més hidrogen i diòxid de carboni. Aquesta reacció, al ser exotèrmica, utilitzarà la calor que desprèn mitjançant bescanviadors de calor per facilitar la reacció de la primera etapa.
- Finalment, la tercera etapa consisteix en la separació del hidrogen del gas total, que conté una mescla d'hidrogen, diòxid de carboni, aigua, monòxid de carboni i metà, a través de mètodes com la separació per membranes o l'adsorció - desadsorció, aconseguint així hidrogen d'una puresa del 99,99%.

Actualment, aquest és el mètode d'obtenció d'hidrogen més utilitzat, donat que el rendiment és del 80%. (36)

4.1.2. OXIDACIÓ PARCIAL DELS HIDROCARBURS

En la reacció d'oxidació parcial intervé el metà, per aquest motiu, només es podrà fer a través de gas natural o biogàs.

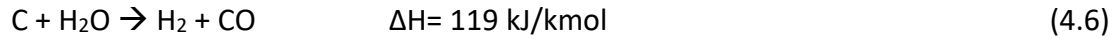


La reacció (4.5) requereix temperatures de 800°C sota la presència de catalitzadors. A l'igual que en el reformat, el monòxid de carboni produït es pot utilitzar per generar més hidrogen a partir de la reacció (4.2). Un dels avantatges és que al tractar-se d'una reacció exotèrmica necessitarà menor energia, donat que aprofita la de la reacció. En canvi, té dos inconvenients, un és que existeix la possibilitat de l'enverinament del catalitzador a partir del monòxid de carboni, fet que complica el procés, i l'altre és l'alta inversió inicial que requereix la instal·lació. El rendiment del mètode és del 70%. (36)



4.1.3. GASIFICACIÓ

El mètode de gasificació es tracta d'una combustió amb absència d'oxigen que utilitzarà carbó com a font de carboni, la reacció és la següent:



La reacció (4.6) treballa a temperatures de 700 a 1500°C i com que es tracta d'una reacció endotèrmica té un gran consum energètic, per aquest motiu, s'introduirà una part d'oxigen, per així, al mateix temps, obtenir una reacció d'oxidació parcial (4.7). Aquesta última, com que és exotèrmica, reduirà el consum energètic de la gasificació. Igual que en els altres mètodes, el monòxid de carboni obtingut com a producte es pot combinar amb vapor d'aigua per obtenir hidrogen i diòxid carboni (4.2). El rendiment total es baix en comparació al reformat i l'oxidació parcial dels hidrocarburs. (37)

4.2. PRODUCCIÓ D'HIDROGEN A PARTIR DE FONTS RENOVABLES

L'aigua, a diferència dels combustibles fòssils, és una font renovable a partir de la qual es pot extreure hidrogen mitjançant diferents mètodes. Aquest fet és de gran interès, donat que la producció d'hidrogen a partir d'aigua no estaria subjecta a l'emissió de gasos contaminants i no dependria de combustibles limitats. També, hi ha altres fonts renovables com és el cas de la biomassa.

Hi ha tres mètodes principals per a la producció d'hidrogen a partir de fonts renovables, a través de la electròlisi de l'aigua, dels processos termoquímics de l'aigua i de la gasificació de la biomassa.

4.2.1. ELECTRÒLISIS DE L'AIGUA

El següent mètode consisteix en la utilització d'un corrent elèctric per trencar els enllaços de la molècula d'aigua, alliberant hidrogen i oxigen. La reacció global és la següent:



Aquest procés es realitza en una cel·la que té un càtode i un ànode connectats a un corrent elèctric. Aquests dos queden separats per un diafragma, que és l'encarregat de que no hi hagi contacte entre l'oxigen i l'hidrogen. Un cop comenci la reacció, els àtoms d'hidrogen són atrets al càtode i els d'oxigen a l'ànode.

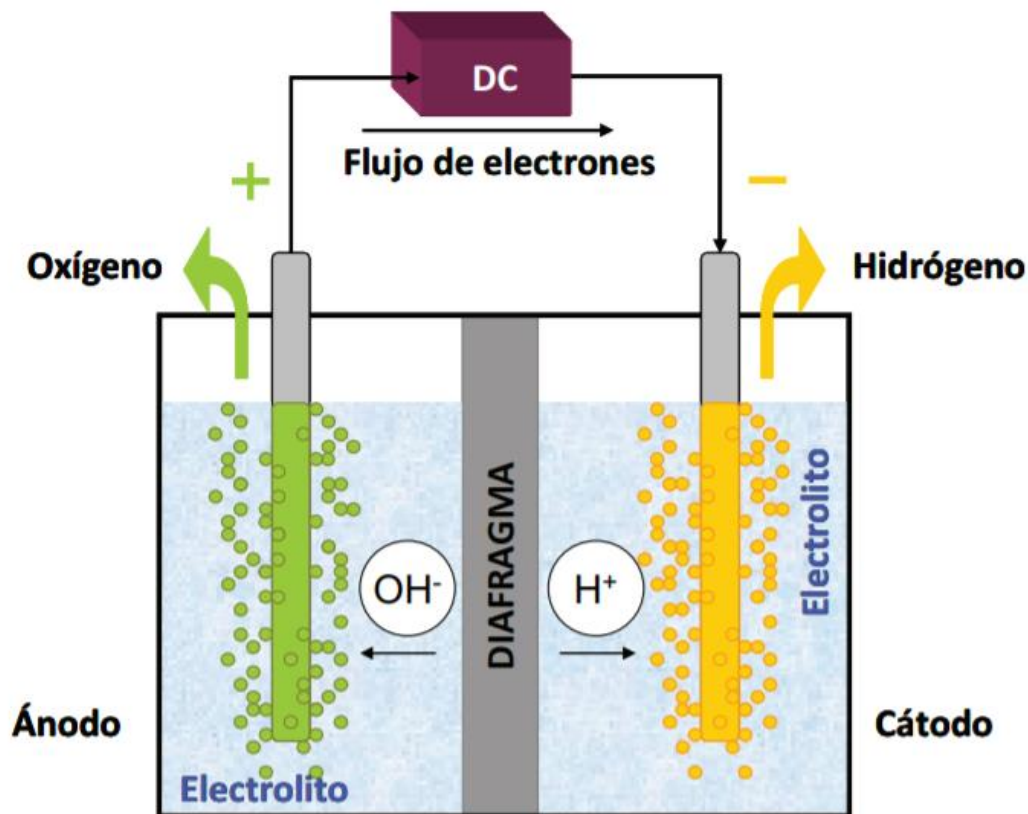


Figura 12. Cel·la d'electròlisis d'aigua. Font: (37)

Aquesta cel·la, anomenada electrolitzador, queda banyada per un electròlit, substància que es comporta com a medi conductor elèctric. La utilització de la substància que faci d'electròlit determinarà de quin tipus d'electrolitzador es tracta, podrà ser: Un electrolitzador alcalí, un electrolitzador de membrana d'intercanvi protònic o un electrolitzador d'òxids sòlids. (37)

4.2.1.1. ELECTROLITZADORS ALCALINS

L'electròlit a utilitzar és una base forta com l'hidròxid de sodi o l'hidròxid de potassi. L'avantatge que presenta aquest tipus d'electròlit és la gran conductivitat iònica, no es descompon amb el voltatge a utilitzar i un gran marge d'operació del pH, que variarà en funció de la concentració dels productes. La concentració de la base forta a utilitzar és del 25-30% (38), concentració en la que l'electròlit té màxima conductivitat. Així mateix, com que l'electròlit té millor conductivitat a major temperatura, la cel·la treballa a 80-90°C garantint al mateix temps que no canviï a estat gasós. Les reaccions que es produiran són les següents:



La reacció (4.9) es durà a terme en el càtode i la (4.10) en el ànode. El diafragma evita el contacte de l'hidrogen amb l'oxigen perquè és porós i permet el flux d'electròlit però no de les bombolles d'hidrogen o oxigen, donat que els porus són d'un diàmetre inferior a 10 µm. (37)

Mitjançant aquest mètode s'aconsegueix obtenir hidrogen amb una puresa del 99,8% (38), sent l'eficiència del procés del 60-80% (37). El problema principal que presenta, com els altres mètodes d'electròlisi, és el gran consum energètic que requereix.

4.2.1.2. ELECTROLITZADOR DE MEMBRANA D'INTERCANVI PROTÒNIC

L'electròlisi a través d'una membrana d'intercanvi protònic es produirà en un diafragma que té incorporats àcids sulfònics (HSO_3^-) i que, a l'hidratar-se amb l'aigua, es dissocien formant SO_3^{2-} i H^+ , facilitant així la conducció protònica (39). Al tractar-se d'una reacció àcida, la membrana utilitza com a electròlit un polímer (37). Les reaccions que es produiran són les següents:



La reacció (4.11) es produeix en el ànode i la (4.12) en el càtode. L'inconvenient d'aquest mètode és el cost elevat dels materials a utilitzar, ja que han de ser tractats amb àcids. Tot i així, els avantatges són importants, l'eficiència del procés és del 80-90% (40), consumint menys energia que el mètode de l'electrolitzador alcalí, al poder treballar amb menors voltatges i a més pressió i, a més, s'aconsegueix un hidrogen amb una puresa del 99,9999%. De totes maneres, aquest mètode encara està en procés de desenvolupament. (37)

4.2.1.3. ELECTROLITZADOR D'ÒXIDS SÒLIDS

Aquest mètode es caracteritza per treballar a temperatures de 1000°C, per accelerar la cinètica de la reacció. Per aquest motiu, s'utilitzen materials ceràmics com a electròlit, donada la seva estabilitat a aquestes temperatures (37). Les reaccions que intervindran són:



La reacció (4.13) es dona en el càtode i la (4.14) en el ànode (37). Les avantatges d'aquest mètode són que les pèrdues de corrent són mínimes i que es treballa a menys voltatge que les anteriors, tenint així una eficiència molt propera al 100% (38).

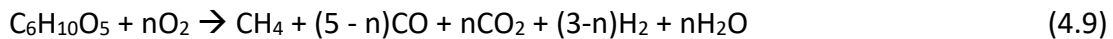
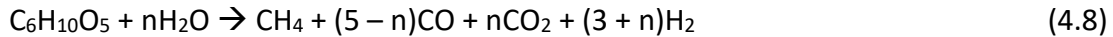
4.2.2. PROCESSOS TERMOQUÍMICS DE L'AIGUA

La termòlisi de l'aigua és un procés en que, a través de la temperatura, es realitza el trencament dels enllaços de la molècula d'aigua, alliberant així hidrogen i oxigen. El problema és que es requereix temperatures de fins a 5000°C, fet que suposa un gran problema, donat que treballant a aquestes temperatures, no hi ha material que no es fongui, sense tenir en compte l'inconvenient de l'energia a consumir.

Com a solució a la problemàtica anterior, sorgeixen els processos termoquímics, que consisteixen en obtenir productes a partir de reaccions químiques amb l'aigua, els quals alliberen l'hidrogen a temperatures de 1000°C i, fins i tot, alguns a 600°C. Actualment, existeixen més de 100 processos per obtenir hidrogen mitjançant aquest mètode, l'inconvenient es que l'eficiència energètica del mètode és entorn al 25-55%, motiu pel qual encara requereix molta recerca. (41)

4.2.3 PRODUCCIÓ D'HIDROGEN A PARTIR DE BIOMASSA

A diferència dels mètodes anteriors, s'utilitzarà biomassa per a la producció d'hidrogen, i consistirà en una gasificació, tal i com s'ha pogut veure en el apartat 4.1.3. *Gasificació*. La reacció, agafant com exemple la cel·lulosa, és la següent:



A partir de la biomassa es fa una reacció de combustió, amb absència d'oxigen, per formar hidrogen (4.8). Aquesta, com que es endotèrmica i consumeix molta energia, genera una altra d'oxidació parcial (4.9) que també dona com a producte metà, però menys hidrogen. A diferència de la reacció (4.8), la (4.9) és exotèrmica, cosa que fa que el procés consumeixi menys energia. Amb el metà i el monòxid de carboni que s'ha produït en les reaccions (4.8) i (4.9), es donen les reaccions (4.10) i (4.11), generant així la totalitat de l'hidrogen que allibera la cel·lulosa. (37)

Aquest mètode genera molta quantitat de diòxid de carboni, però com que per produir biomassa es requereix diòxid de carboni pel creixement de la pròpia matèria, es tractaria d'un mètode de zero emissions, no tenint així cap impacte pel medi ambient.

4.3. COMPARACIÓ

Els vehicles elèctrics de pila d'hidrogen són una alternativa que té com a objectiu no dependre de combustibles fòssils, per tant, el procés de producció del seu combustible no hauria de ser diferent. En la comparació que es farà a continuació es descartaran els mètodes de producció de l'hidrogen a partir de combustibles fòssils.

Els diferents mètodes estudiats per produir hidrogen a partir de l'aigua consumeixen molta energia. Dels dos mètodes analitzats, l'electròlisi de l'aigua i els processos termoquímics de l'aigua, es descartarà el segon, donat que, pel moment, les eficiències del procés són més baixes.

A partir de l'electròlisi de l'aigua, s'han pogut estudiar tres mètodes, representats en la següent taula:

Electrolitzador	Alcalí	Membrana d'intercanvi protònic	Òxid sòlid
Electròlit	NaOH o KOH	Polímer	Ceràmica
Portador carga	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Temperatura	80°C	80°C	1000°C
Avantatges	Tecnologia portada a gran escala	Menor consum energètic Hidrogen Pur	Menor consum energètic
Desavantatges	Major consum energètic	Preu d'inversió més elevat Tecnologia en evolució	Tecnologia poc estudiada

Taula 11. Mètodes de l'electròlisi de l'aigua. Font: (37)

Actualment, l'electròlisi a través d'electrolitzador alcalí és la que s'ha portat a gran escala, però és la que més energia consumeix de les tres. La que menys consumeix és la d'òxid sòlid que requereix un 10% menys energia que la primera, el problema és que encara no està lo suficientment estudiada. La de membrana d'intercanvi protònic consumeix menys que la de l'electrolitzador alcalí i obté hidrogen pur i, tot i que el preu d'inversió és més elevat, pot ser una bona alternativa en el futur per a la producció de l'hidrogen.

La producció mitjançant biomassa també és una bona alternativa a tenir en compte, però, al tractar-se d'una gasificació, és un mètode amb pitjor rendiment que l'electròlisi i, a més, necessita més terreny i subministres per produir la biomassa necessària. De totes maneres, és un mètode sostenible amb el medi ambient i en un futur es podria arribar a tenir en compte si es millora.

5. EMMAGATZEMATGE I TRANSPORT DE L'HIDROGEN

Es pot dir que l'hidrogen és un vector elèctric, donat que requereix energia per obtenir l'hidrogen i ens retorna energia quan reacciona, d'aquesta manera, ens pot servir tant com a combustible com per emmagatzemar energia. Per aquesta raó, és d'interès en el món de l'automoció i també per les productores elèctriques, ja que quan la demanda elèctrica sigui més baixa que la producció, es podrà utilitzar aquesta energia elèctrica sobrant per produir hidrogen i així aconseguir una forma d'emmagatzemar electricitat.

L'hidrogen, per les característiques físiques i químiques que presenta, comporta una gran dificultat per emmagatzemar-lo en comparació a altres combustibles. Temps enrere, la recerca d'un mètode adequat per a emmagatzemar hidrogen va suposar un gran obstacle, especialment en el món de l'automoció, donat que aquest combustible té una gran densitat energètica per unitat de massa (39.300 Wh/kg), però molt baixa per unitat de volum (750 Wh/l a 350 bars de pressió) (12), requerint dipòsits més grans que altres tipus de vehicles de combustió. A més, l'hidrogen té una gran difusivitat, fet que ocasiona petites pèrdues del combustible en els dipòsits, ja que es capaç de, fins i tot, ser difós a través d'un sòlid (42).

Com que l'hidrogen té molt baixa densitat, per ser emmagatzemat necessita grans dipòsits. Per aquest motiu, el seu emmagatzematge es veurà relacionat amb pressions elevades, temperatures baixes i/o combinat amb d'altres materials, per tal d'augmentar la seva densitat, a l'objecte de concentrar la màxima densitat energètica en el menor volum.

Avui en dia, tot i que s'està fent molta recerca en aquest camp, existeixen dos mètodes bàsics per emmagatzemar l'hidrogen:

- Emmagatzematge de l'hidrogen mitjançant mètodes físics: En el qual es troba l'hidrogen comprimit, l'hidrogen líquid, l'hidrogen crio-comprimit i l'adsorció per carbó activat.
- Emmagatzematge de l'hidrogen a través de mètodes químics: Destaca l'ús d'hidrocarburs metàl·lics, de l'alumini, de l'amoniac, de l'amino-borà i dels líquids orgànics.

A continuació s'explicarà en detall els diferents mètodes comentats.

5.1. EMMAGATZEMATGE DE L'HIDROGEN MITJANÇANT MÈTODES FÍSICS

5.1.1. HIDROGEN COMPRIMIT

Comprimir l'hidrogen és el mètode més utilitzat, especialment en els vehicles de pila d'hidrogen. Al comprimir l'hidrogen s'aconsegueix una major densitat per volum, el que fa que es redueixin les dimensions del tanc de combustible del vehicle on es diposita. En el següent gràfic es pot veure una variació de la densitat de l'hidrogen a l'incrementar la pressió a una temperatura constant de 20°C:

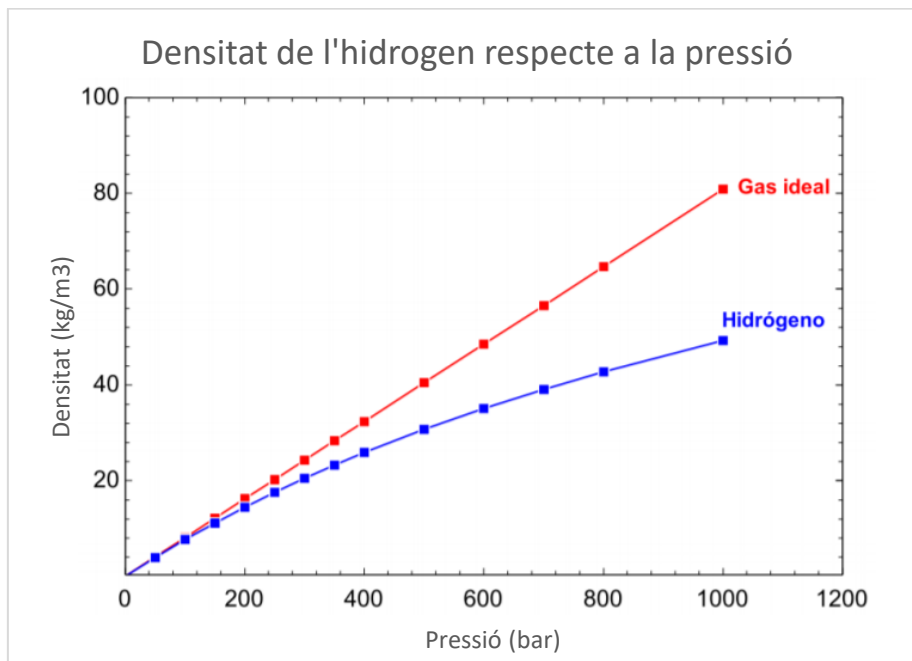


Figura 13. Densitat de l'hidrogen respecte a la pressió. Font: (42)

	Densitat (kg/m3)
Hidrogen (250 bar)	17,86
Hidrogen (500 bar)	31,22
Hidrogen (700 bar)	39,69

Taula 12. Densitat de l'hidrogen respecte a la pressió. Font: Pròpia

Actualment, en els dipòsits dels vehicles, l'hidrogen es comprimit a pressions de fins 700 bar, si bé, en les hidrogenaries, l'hidrogen pot trobar-se, fins i tot, a 1000 bar. Un tanc d'alumini o acer no pot aguantar pressions tan elevades, per aquesta raó, els tancs d'hidrogen estaran especialment preparats. Fins al moment, s'han desenvolupat quatre tecnologies de tancs que són anomenats Tipus I, II, III i IV.

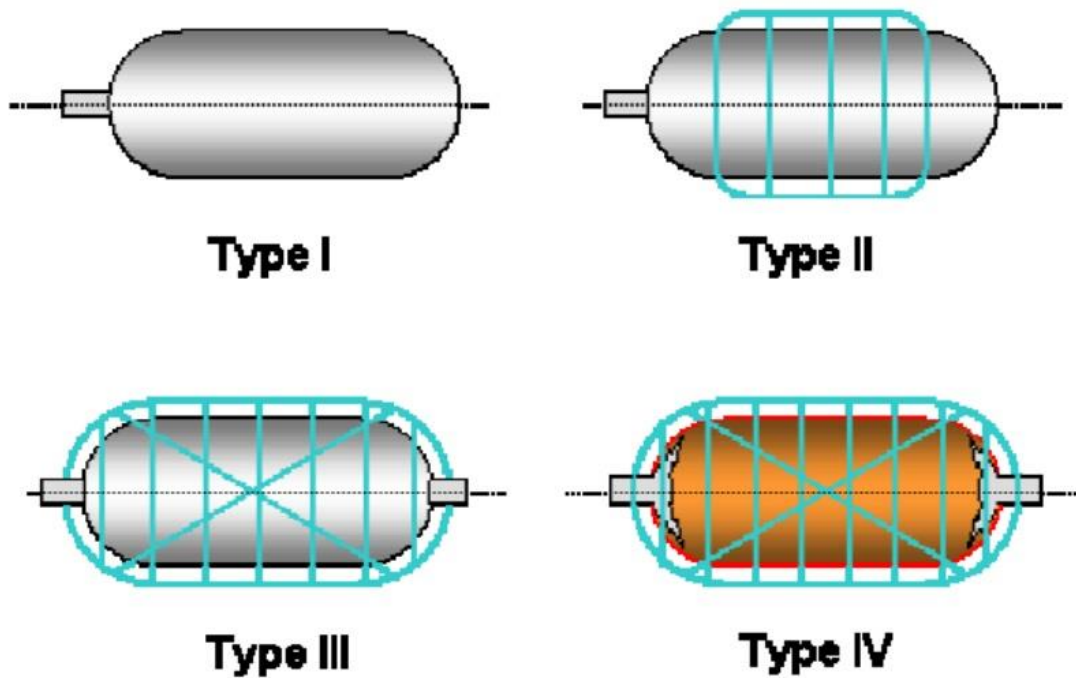


Figura 14. Tancs d'hidrogen comprimit tipus I, II, III i IV. Font: (43)

- **Tipus I:** Són tancs d'acer o alumini, que suporten pressions fins a 175 bars els d'alumini i 200 bars els d'acer. La principal avantatge és que són econòmics, però la desavantatge és que són pesats, al tenir parets metàl·liques molt gruixudes. Aquests dipòsits, quan estan plens, només poden emmagatzemar el 1% de pes en hidrogen del pes total, motiu pel qual no serà l'opció més adequada pels vehicles. (43)



Figura 15. Tanc d'hidrogen comprimit tipus I. Font: (44)

- **Tipus II:** Són iguals que els anteriors, però estan reforçats al llarg de l'altura del dipòsit cilíndric mitjançant materials compostos per una xarxa de fibres de carboni o de fibres de vidre. L'avantatge és que arriben a suportar pressions de fins a 1000 bars i la desavantatge és que encara són pesats. No és la millor opció pels vehicles pel pes del tanc, però sí és molt bona opció per hidrogenaries, ja que suporten grans pressions. (43)

- **Tipus III.** Són dipòsits on les parets d'acer o alumini són molt menys gruixudes que en el cas de tipus I y II, i porten un recobriment complet de materials compostos de fibres de carboni o vidre, podent arribar a suportar pressions de 700 bars. La principal avantatge és la lleugeresa en comparació als anteriors, però l'inconvenient és que són més costosos. (43)



Figura 16. Tanc d'hidrogen comprimit tipus II. Font: (44)

- **Tipus IV:** En els tancs tipus IV se suprimeix la capa metàl·lica i se substitueix per una capa de polietilè. Igual que en el cas anterior es recobreix per una capa gruixuda de fibres de carboni o vidre, arribant a suportar pressions de 700 bars. La principal avantatge és que el tanc és més lleuger, degut als materials que el componen, i, a més, que té una gran capacitat d'emmagatzematge, podent arribar a un 11% d'hidrogen en pes del pes total del dipòsit. Les desavantatges són un cost elevat, una major difusivitat de l'hidrogen a través de la capa de polietilè en comparació a la metàl·lica i un menor nombre de cicles de càrrega i descàrrega. (43)



Figura 17. Tanc d'hidrogen comprimit tipus IV. Font: (44)



Després d'haver explicat breument les diferents maneres d'emmagatzemar hidrogen comprimit, s'arriba a la conclusió de que no hi ha un tipus de tanc millor que els altres. Els tancs tipus I y II, són bones opcions en els casos que es vulgui emmagatzemar a gran escala, donat que són més econòmics, el tipus I està més enfocat per a la utilització en laboratoris i el tipus II en hidrogenaries. En canvi, els tancs tipus III i IV estan pensats per a l'ús en vehicles propulsats per hidrogen degut a la seva gran capacitat gravimètrica (percentatge màxim de massa de combustible respecte del total, dipòsit més combustible).

5.1.2. HIDROGEN LÍQUID

A l'emmagatzemar l'hidrogen en estat líquid, o també anomenat hidrogen criogènic, s'aconsegueix una major densitat de l'hidrogen. Si en un tanc a 700 bar la densitat del hidrogen és de $39,69 \text{ kg/m}^3$, l'hidrogen en estat líquid té una densitat de $70,85 \text{ kg/m}^3$ (45), el que vol dir que l'hidrogen líquid ocupa menys volum i permet que les dimensions del tanc d'emmagatzematge siguin menors.

La dificultat d'aquest mètode és que és necessari mantenir una temperatura de -253 °C per a que l'hidrogen es trobi en estat líquid. Per tant, per liquar l'hidrogen és requereix aproximadament un 30% de l'energia del contingut energètic de l'hidrogen liquat, a més d'uns dipòsits molt ben aïllats per conservar a tan baixa temperatura. Els tancs utilitzats s'anomenen "Dewar", el bon aïllament d'aquests permet que l'hidrogen pugui ser emmagatzemat en el tanc durant 10 dies, abans de que sigui necessari expulsar part del hidrogen que s'ha transformat a estat gasós. A partir d'aquest moment, perdrà diàriament del 1% al 2% de la seva capacitat total. (42)

Normalment, aquest mètode està pensat per emmagatzemar grans quantitats d'hidrogen, tot i així, BMW ja ha utilitzat aquesta tecnologia en prototips propis (46). El seu avantatge principal és la capacitat d'emmagatzemar hidrogen amb el menor volum possible, en comparació als demés mètodes físics d'emmagatzematge. L'inconvenient és que no pot ser emmagatzemat per períodes llargs a causa de les pèrdues i el requeriment energètic que implica liquar l'hidrogen.



5.1.3. HIDROGEN CRIO-COMPRIMIT

El següent mètode consisteix en refredar l'hidrogen per ser comprimit a continuació. D'aquesta manera, es comprimeix l'hidrogen amb major densitat i, per tant, es guanya més densitat gravimètrica. El refredament comentat requereix una entrada d'energia addicional, d'entre el 9 i el 12% del contingut energètic de l'hidrogen emmagatzemat. (46)

5.1.4. ADSORCIÓ PER CARBÓ ACTIVAT

El carbó activat és un material porós molt adsorbent. Aquesta característica li fa molt útil per emmagatzemar hidrogen a temperatures baixes, per sota dels -85°C i pressions per damunt de 21 bars, on el carbó activat és capaç d'adsorbir grans quantitats d'hidrogen, sobretot si es disminueix més la temperatura i s'augmenta la pressió. En canvi, a 150°C el carbó allibera l'hidrogen. (42)

Aquest mètode té les avantatges d'emmagatzemar l'hidrogen de manera completament segura amb grans concentracions per volum, però és un mètode costós, tan energèticament com pel preu elevat del material a utilitzar.

5.2. EMMAGATZEMATGE DE L'HIDROGEN MITJANÇANT MÈTODES QUÍMICS

En els darrers anys, s'ha vist la gran dificultat d'emmagatzemar l'hidrogen a través de mètodes físics, que impliquen grans volums de dipòsits i costos elevats, per a que els vehicles d'hidrogen obtinguessin autonomies acceptables, com és el cas del *Toyota Mirai*, que, a partir d'un dipòsit de 122,4 litres, aconsegueix una autonomia de només 489 quilometres (47).

Per aquesta raó, s'ha investigat l'ús de materials alternatius per transportar o extreure l'hidrogen a partir de reaccions químiques, facilitant d'aquesta manera el procés d'emmagatzematge i del transport de l'hidrogen.

Actualment, aquest tipus d'emmagatzematge de l'hidrogen està en fase d'investigació, analitzant la seva viabilitat en els vehicles.

5.2.1. HIDRURS METÀL·LICS

Diversos metalls i aliatges com les de magnesi, titani, ferro, manganès, níquel o crom tenen tendència a combinar-se amb l'hidrogen formant hidrurs metàl·lics. Els enllaços formats es poden destruir de dos maneres, per piròlisi o per hidròlisi (48).

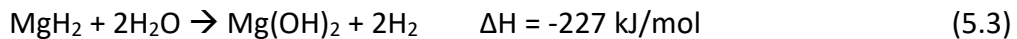


Per fer una comparació del mètode per piròlisi i el d'hidròlisi s'agafarà l'hidrur de magnesi com exemple, donat que entre totes les opcions és el que té menor pes molecular i és molt abundant en el planeta.

- Fraccionament per piròlisi: Per destruir els enllaços de l'hidrur de magnesi es necessiten temperatures entorn als 410-423°C. Al ser tan elevada, s'ha investigat amb l'ús de metalls que actuïn com a catalitzadors o de nano-tubs de carboni, donat que disminueixen la temperatura a 150-250°C. (49)



- Fraccionament per hidròlisi: Al combinar l'hidrur de magnesi amb aigua, s'aconsegueix una reacció exotèrmica de la següent manera (48):



El percentatge en massa d'hidrogen que hi hauria en cadascuna de les reaccions és el següent respectivament:

- % en massa d'H₂ del total de la reacció a partir del fraccionament per piròlisi

$$\frac{\text{pes molecular (H}_2\text{)}}{\text{pes molecular reactius (MgH}_2\text{)}} \cdot 100 = 7,66\%$$

- % en massa d'H₂ del total de la reacció a partir del fraccionament per hidròlisi

$$\frac{\text{pes molecular (2H}_2\text{)}}{\text{pes molecular reactius (MgH}_2\text{+2H}_2\text{O)}} \cdot 100 = 7,43\%$$

El percentatge en massa de l'hidrogen aplicant els dos mètodes és pràcticament igual, però, si es té en compte que pel fraccionament a partir de la hidròlisi es pot utilitzar la mateixa aigua que es produirà a la pila d'hidrogen a partir de la reacció de l'hidrogen amb l'oxigen, llavors, en comptes de necessitar dos molècules d'aigua per cada molècula d'hidrur de magnesi, només es requerirà aportar una. D'aquesta manera, es podria dir que el pes gravimètric és:

$$\frac{\text{massa molecular (2H}_2\text{)}}{\text{massa molecular reactius (MgH}_2\text{+H}_2\text{O)}} \cdot 100 = 9,09\%$$

Tenint en compte aquest últim concepte, el fraccionament per hidròlisi té millor pes gravimètric respecte al de per piròlisi, a més, la reacció és exotèrmica mentre que la de per piròlisi és endotèrmica, el que permetrà un estalvi energètic i, per tant, un millor rendiment del vehicle. Una altra avantatge que té el fraccionament per hidròlisi és que requereix la meitat de combustible procedent d'hidrurs metàl·lics, ja que utilitzaria al mateix temps aigua com a combustible. L'únic inconvenient en relació al mètode per piròlisi es que el producte residual serà l'hidròxid del metall i no el metall en estat pur, tot i així, es podria reciclar l'hidròxid de magnesi a la seva totalitat tornant a generar l'hidrur metàl·lic.

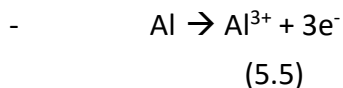


Les parts positives de l'aplicació d'aquest mètode són que tenim una major densitat d'hidrogen, per tant, major combustible amb un menor volum i, també, al trobar-se el combustible en estat sòlid, major seguretat.

Actualment aquest mètode és un dels més investigats vers la seva aplicació dins dels vehicles d'hidrogen. (49)

5.2.2. ALUMINI

Amb l'alumini es pot sintetitzar hidrogen mitjançant una reacció redox a partir de l'oxidació de l'alumini. En la reacció, l'alumini dona els electrons i l'hidrogen els rep, com es pot veure a continuació:

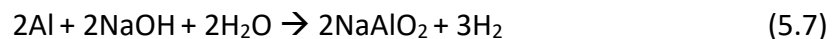


L'oxidació de l'alumini es pot fer de dos maneres, a partir d'un àcid fort o a través d'una base forta.

A partir d'un àcid fort, utilitzant per exemple l'àcid clorhídric, tenint la reacció global:



A través d'una base forta, es pot utilitzar el NaOH combinat amb aigua, donant:



Les dos reaccions són exotèrmiques, per tant, no tindrà un consum energètic per obtenir hidrogen.

A continuació es calcularà el percentatge en massa d'hidrogen obtingut a partir de les dues maneres comentades.



% en massa d'H₂ del total en la reacció amb HCl

$$\frac{\text{pes molecular (3 H}_2\text{)}}{\text{pes molecular reactius (6 HCl+2 Al)}} \cdot 100 = 2,22\%$$

% en massa d'H₂ del total en la reacció amb NaOH

$$\frac{\text{pes molecular (3 H}_2\text{)}}{\text{pes molecular reactius (2NaOH+2H}_2\text{O+ 2 Al)}} \cdot 100 = 3,56\%$$

Com es pot observar, l'oxidació de l'alumini mitjançant hidròxid de sodi produeix una major quantitat d'hidrogen per unitat de massa. Tot i així, aquest mètode no té viabilitat, donat el menor percentatge d'hidrogen que s'obté en comparació al cas del apartat 5.2.1 *Hidrurs Metàl·lics*, i, també, per la necessitat de reciclar el producte residual.

5.2.3. AMONÍAC

L'amoníac és un element capaç d'emmagatzemar gran quantitat d'hidrogen, tenint així una gran densitat gravimètrica. La reacció global és la següent:



El percentatge en massa d'H₂ del total en la reacció

$$\frac{\text{pes molecular (3 H}_2\text{)}}{\text{pes molecular reactius (2 NH}_3\text{)}} \cdot 100 = 17,75\%$$

Com s'observa, la densitat gravimètrica és molt alta, la reacció global consta de dos reaccions, en les que, en una intervé el sodi com a reactiu i en l'altre es recupera en forma de producte.



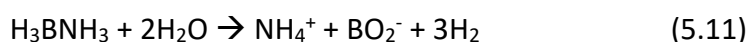


La reacció de la sodi amida és endotèrmica i requereix una entalpia de 123,8 kJ/mol, pel que serà necessari treballar a 343°C, el que suposa un gran inconvenient, donada la gran despesa energètica, a més de que l'amoníac, al ser altament tòxic, fa que aquest mètode sigui menys recomanable en comparació als ja comentats. (50)

5.2.4. AMINA-BORÀ

L'amina-borà és un compost químic (NH_3BH_3) que té una gran capacitat d'emmagatzematge d'hidrogen i del que es pot extreure l'hidrogen de dues maneres:

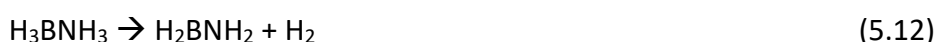
- Fraccionament per hidròlisi: La reacció es pot fer a temperatura ambient però amb una cinètica molt lenta, pel que serà necessari augmentar la temperatura i disminuir el pH (50). La reacció és la següent:



Si es fan els càlculs realitzats anteriorment, en aquest cas, resulta una densitat gravimètrica del 9,04%

- Fraccionament per piròlisi: La reacció es completa, alliberant tot l'hidrogen si es treballa a temperatures de 500°C. En total hi ha tres reaccions:

1ª Reacció, temperatura entre 80-110°C, densitat gravimètrica de 6,53%



2ª Reacció, temperatura de 120°C, densitat gravimètrica de 6,99%



3ª Reacció, temperatura de 500°C, densitat gravimètrica de 7,51%



Tot i que s'ha de treballar a 500°C per aconseguir alliberar el màxim d'hidrogen i tenir una densitat gravimètrica total de 21,03%, al tractar-se de reaccions exotèrmiques, només s'ha d'aportar un 3-4% de l'energia total que s'extraurà de l'hidrogen. (51)

Dels dos mètodes comentats, el de fraccionament per piròlisi té una densitat gravimètrica major i l'energia que s'ha d'aportar és petita perquè només serà necessari a l'inici (donat que necessita una temperatura alta per iniciar la reacció exotèrmica), lo que el fa més viable respecte al d'hidròlisi. L'inconvenient del mètode de piròlisi és que, al tractar-se de diferents reaccions, ens pot donar diferents productes residuals, fet que pot dificultar el reciclatge posterior.

Actualment, la utilització de l'amina-borà per emmagatzemar hidrogen és un mètode en el qual s'està invertint molt en I+D vers a la seva aplicació en els vehicles d'hidrogen. (49)

5.2.5. LÍQUIDS ORGÀNICS

A diferència dels mètodes anteriors, aquest consisteix en la utilització d'olis o alcohols per extreure l'hidrogen.

El "HYDRNOL" és un líquid orgànic en procés d'investigació que té una densitat gravimètrica de 5,81% d'hidrogen i, tot i ser baixa la concentració d'hidrogen en massa, pot emmagatzemar 109,38 kg H₂/m³ (52). Com a referència, l'hidrogen líquid té una densitat de 70,80 kg/m³. La reacció de deshidrogenació és la següent:



L'HYDRNOL pot ser reciclat fins a 100 cops a partir d'una hidrogenació:





Els líquids orgànics tenen una sèrie d'avantatges, es poden emmagatzemar sense dificultat donat que la majoria són líquids a temperatura ambient, no presenten cap problema de seguretat i es poden reciclar. També d'inconvenients, necessiten una quarta part de l'energia que conté l'hidrogen total que emmagatzema per alliberar-lo, ja que es tracta d'una reacció catalítica i, sobretot, el perill de les reaccions secundàries que es poden donar al deshidrogenar el líquid, que poden provocar gasos com el monòxid de carboni que danyaria la pila de combustible.



5.3. COMPARACIÓ

En la següent taula es realitza una comparació de les principals avantatges i desavantatges dels mètodes físics i químics per emmagatzemar hidrogen.

EMMAGATZEMATGE DE L'HIDROGEN	
MÈTODES FÍSICS	MÈTODES QUÍMICS
AVANTATGES	
Menor pes del combustible	Menor volum del combustible Alta seguretat No presenta pèrdues del combustible
DESavantatges	
Major volum del combustible Combustible altament perillós Presenta pèrdues del combustible Complexitat dels dipòsits	Major pes del combustible Més complexitat del combustible Reciclatge dels materials residuals

Taula 13. Emmagatzematge de l'hidrogen. Font: Pròpia

Dins dels mètodes físics, destaca el d'hidrogen comprimit i el crio-comprimit pel seu menor requeriment energètic a l'hora d'emmagatzemar l'hidrogen, tot i haver d'utilitzar dipòsits més voluminosos.

Actualment, el mètode d'hidrogen comprimit és l'alternativa més viable per emmagatzemar hidrogen. Malgrat que els dipòsits han de ser voluminosos, hi ha models de vehicles que utilitzant dipòsits tipo III i IV han aconseguit grans autonomies, un cas és el Hyundai Nexu que, amb un dipòsit de 156 litres, aconsegueix 800 km d'autonomia (53). Aquest exemple demostra la viabilitat d'aquests dipòsits pels vehicles d'hidrogen, el problema sorgirà quan es vulgui portar a gran escala, pels següents motius:

- Transport: A causa de la gran difusivitat de l'hidrogen representarà grans pèrdues d'aquest combustible durant el transport, afectant al rendiment energètic total del procés, donat que aquestes pèrdues d'hidrogen es poden traduir en despeses energètiques.
- Emmagatzematge: En el cas de que hi hagi una gran demanda de combustible, serà necessari la disposició de grans espais per emmagatzemar el combustible, fet que augmentarà la seva perillositat i un encariment del producte cap al client.
- Preu dipòsit: La gran complexitat dels dipòsits no els fa econòmics, el que no ajudarà a obtenir un preu competitiu del vehicle.

A diferència dels mètodes físics, els químics no presenten pèrdues en el procés de transport, el dipòsits ocupen menors volums a l'hora d'emmagatzemar l'hidrogen, no presenten cap complexitat, són més segurs i més econòmics. Pels motius comentats, els mètodes d'emmagatzematge químics són una oportunitat en procés d'evolució per a que l'alternativa del vehicle d'hidrogen sigui viable i competitiva front a la dels vehicles elèctrics recarregables.

Dins dels mètodes químics, destaca principalment el d'amina-borà i el d'hidrurs metàl·lics.

El mètode químic de l'amina-borà té la gran avantatge de ser el mètode amb major densitat gravimètrica, amb un 21,03% de pes en hidrogen. Un altre aspecte positiu és que les reaccions que es produeixen són exotèrmiques, requerint així poca energia addicional pel trencament dels enllaços. L'inconvenient d'aquest mètode és que, per a que s'alliberi l'hidrogen a la seva totalitat, s'ha de treballar a temperatures altes (500°C) i que, a l'involucrar diferents reaccions en el fraccionament mitjançant piròlisi, pot donar lloc a diferents productes residuals, dificultant així el seu posterior reciclatge.

En canvi, el mètode químic per hidrurs metàl·lics té l'inconvenient de que té menys densitat gravimètrica de pes en hidrogen, però l'avantatge de que els productes residuals seran fàcils de reciclar, realitzant així un cicle de residu zero i donant així una bona resposta a nivell mediambiental.

Dins dels hidrurs metàl·lics, l'hidrur de magnesi és la millor alternativa, al formar-se a partir d'àtoms de magnesi, un material abundant i econòmic i amb millor densitat gravimètrica que les altres opcions. Com ja s'ha comentat, es poden donar dos tipus de reaccions per alliberar l'hidrogen a partir de l'hidrur de magnesi. La reacció d'hidròlisi requereix 2,3 vegades menys d'hidrur de magnesi i, per tant, menor hidrogen produït inicialment que a través de la reacció de piròlisi, donat que utilitzarà l'aigua que genera el vehicle més una altra part d'aigua que s'aportarà addicionalment al vehicle com a segon reactiu. La part negativa és que al reciclar l'hidròxid de magnesi, que ens deixa com a residu, necessitarà més energia que no pas el del residu resultant de la piròlisi.

En l'apartat 9. *ANNEXES*, s'han dissenyat els dipòsits a utilitzar per un vehicle que utilitzi el mètode de l'hidrur de magnesi com a combustible, agafant com a referència els 6,3 kg d'hidrogen comprimit que pot emmagatzemar el Hyundai Nexo (156 litres)(53).

- Per a un vehicle que alliberi l'hidrogen de l'hidrur de magnesi mitjançant la reacció d'hidròlisi, necessita 35,80 kg d'hidrur de magnesi en un dipòsit amb un volum de 24,69 litres, 24,51 kg d'aigua en un altre dipòsit amb un volum de 24,58 litres i un últim dipòsit, amb un volum de 33,89 litres, per emmagatzemar el residu generat per la reacció, l'hidròxid de magnesi. Els tres dipòsits sumen un volum total de 83,16 litres.
- Pel cas que alliberi l'hidrogen a partir de la piròlisi necessita 82,25 kg d'hidrur de magnesi en un dipòsit amb un volum de 56,72 litres. El producte residual, el magnesi, s'emmagatzemarà en un altre dipòsit amb un volum de 43,64 litres. El volum total dels dos dipòsits suma 100,36 litres.

El mètode per hidròlisi, que és el que ens interessa més per les raons comentades anteriorment, requereix menys volum per emmagatzemar el combustible que el d'hidrogen comprimit, aproximadament 3,17 vegades menys de volum sense tenir en compte el volum de les parets dels dipòsits, el d'hidrogen comprimit, al tenir parets més gruixudes, acabaria ocupant encara més volum que l'altre. Quant als vehicles, a l'aplicar el mètode de l'hidrur de magnesi s'ha de tenir en compte que alliberar l'hidrogen de l'hidrur de magnesi produeix, com a residu, hidròxid de magnesi, per aquesta raó, s'utilitzarà un dipòsit addicional per emmagatzemar-lo. Tot i així, els tres dipòsits que utilitzarà aquest mètode redueix el volum a utilitzar 1,88 vegades menys que el d'hidrogen comprimit.

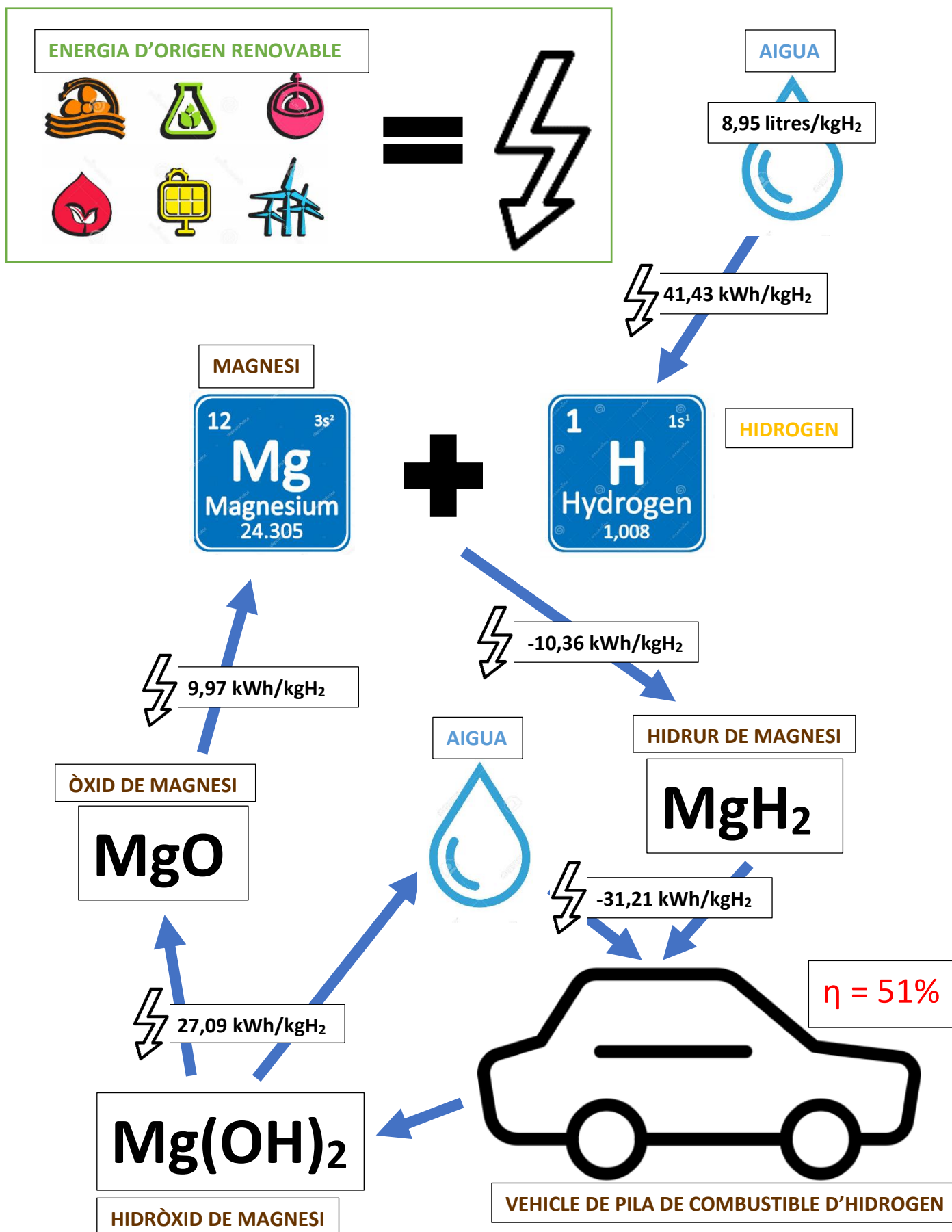
Com a conclusió, el mètode de l'hidrur de magnesi amb reacció d'hidròlisi resulta ser l'opció més idònia per al vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen.

6. VIABILITAT

En aquest apartat es farà un estudi de la viabilitat dels vehicles elèctrics de pila de combustible d'hidrogen tenint en compte la informació i conclusions dels diferents apartats que s'han vist.

Al llarg d'aquest capítol, en els diferents estudis plantejats, es compararà el vehicle elèctric recarregable amb el d'hidrogen, donat que aquestes són les dos alternatives principals als vehicles de combustible fòssils.

A l'hora de fer els següents anàlisi de viabilitat, cal destacar el mètode de l'electròlisi de l'aigua vist en l'apartat 4. *PRODUCCIÓ D'HIDROGEN*, i el mètode d'emmagatzematge a partir de l'hidrur de magnesi que s'ha comentat en l'apartat 5. *EMMAGATZEMATGE I TRANSPORT DE L'HIDROGEN*, ja que, a partir d'aquests dos conceptes, es proposa un cicle de residu zero per complir amb la demanda energètica que requeriran els vehicles elèctrics de pila d'hidrogen, tal i com es pot veure a continuació:



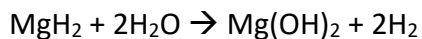
6.1. ESTUDI ENERGÈTIC

Els vehicles elèctrics de pila de combustible d'hidrogen requereixen un alt contingut energètic, donat que l'hidrogen no deixa de ser un vector elèctric.

A continuació, per saber el consum energètic global del cicle que s'ha plantejat al començament d'aquest capítol, es tindrà en compte el requeriment energètic de l'electròlisi, el de la formació del hidrur de magnesi i el del reciclatge del residu del vehicle.

L'electròlisi, com s'ha calculat en el apartat 9. *Annexes*, suposant que té un 80% de rendiment (apartat 4. *PRODUCCIÓ D'HIDROGEN*), consumeix 41,43 kWh per quilogram d'hidrogen. La formació d'hidrur de magnesi requereix -10,36 kWh/kgH₂ i el reciclatge de l'hidròxid de magnesi 37,06 kWh/kgH₂.

Mitjançant el mètode de la hidròlisi del magnesi s'ha de tenir en compte que dins del vehicle per cada mol d'hidrur de magnesi s'aconsegueix com a producte dos mols d'hidrogen, com es pot veure a continuació:



Per tant, es necessitarà 0,5 quilogram d'hidrogen produït inicialment per cada quilogram d'hidrogen que necessiti el vehicle.

La formació de l'hidrur de magnesi és exotèrmica, vol dir, que genera calor. A través d'un intercanviador de calor es pot aprofitar aquesta calor per reduir l'energia necessària per realitzar l'electròlisi. Si se suposa que es podria aprofitar un 60% de l'energia que desprèn la formació de l'hidrur, l'energia total que consumirà per a la producció d'un quilogram d'hidrogen dins del vehicle és la següent:

Energia total per produir un kg d'H₂ = 0,5 · (41,43 + (− 10,36 · 0,6)) + 37,06 = 54,67 kWh/kg H₂



En el cas del Hyundai Nexó té un consum de 0,79 kg d'hidrogen cada 100 quilometres (53), per tant el consum energètic global en aquest cas és:

$$\frac{54,67 \text{ kWh}}{\text{kg H}_2} \cdot \frac{0,79 \text{ kg H}_2}{100 \text{ km}} = 43,19 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$$

El **consum del vehicle elèctric de pila d'hidrogen** és de **43,19 kWh/100 km**, tenint en compte tot el procés que engloba.

En canvi, en el cas dels vehicles elèctrics recarregables, l'electricitat no tindrà transformacions com en el cas dels vehicles elèctrics de pila de combustible d'hidrogen, tenint així un rendiment energètic global més elevat. Per saber el consum energètic global, es parteix del consum actual d'un vehicle elèctric, com per exemple el *Tesla model S*, que és d'uns 18 kWh els 100 quilometres (54). A aquest consum se li haurà de sumar les pèrdues energètiques per efecte joule, al tenir que transportar l'electricitat als diferents punts de càrrega, les pèrdues elèctriques durant el procés de càrrega del vehicle i les pèrdues de la bateria.

Les pèrdues energètiques durant el transport de l'electricitat són aproximadament d'un 10% (55), les pèrdues en el moment de la càrrega de la bateria és del 10% (56), les de la bateria dependrà del temps des de l'última càrrega, però se suposarà un cas favorable del 5%.

$$\text{Pèrdues energètiques} = 0,90 \times 0,90 \times 0,95 = 0,77$$

$$\frac{18 \text{ kWh}/100 \text{ km}}{0,77} = 23,38 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$$

El **consum del vehicle elèctric recarregable** és de **23,38 kWh/100km**, tenint en compte tot el procés que engloba.



A partir de l'estudi es pot concloure que el vehicle elèctric recarregable és 1,85 vegades més eficient energèticament que el vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen, tenint en compte els vehicles que s'han plantejat com exemple.

Tot i això, per obtenir un estudi energètic més precís s'hauria de tenir en compte els costos energètics necessaris per a la fabricació de la infraestructura necessària, la de la producció dels components dels vehicles i la del reciclatge d'aquests mateixos.

6.2. ESTUDI MEDIAMBIENTAL

Actualment, per cobrir tota la demanda energètica a nivell nacional, només el 40% és d'origen renovable (57), però a nivell mundial és tan sols del 5-6%. En el següent gràfic es pot veure l'origen de l'energia elèctrica d'Espanya:

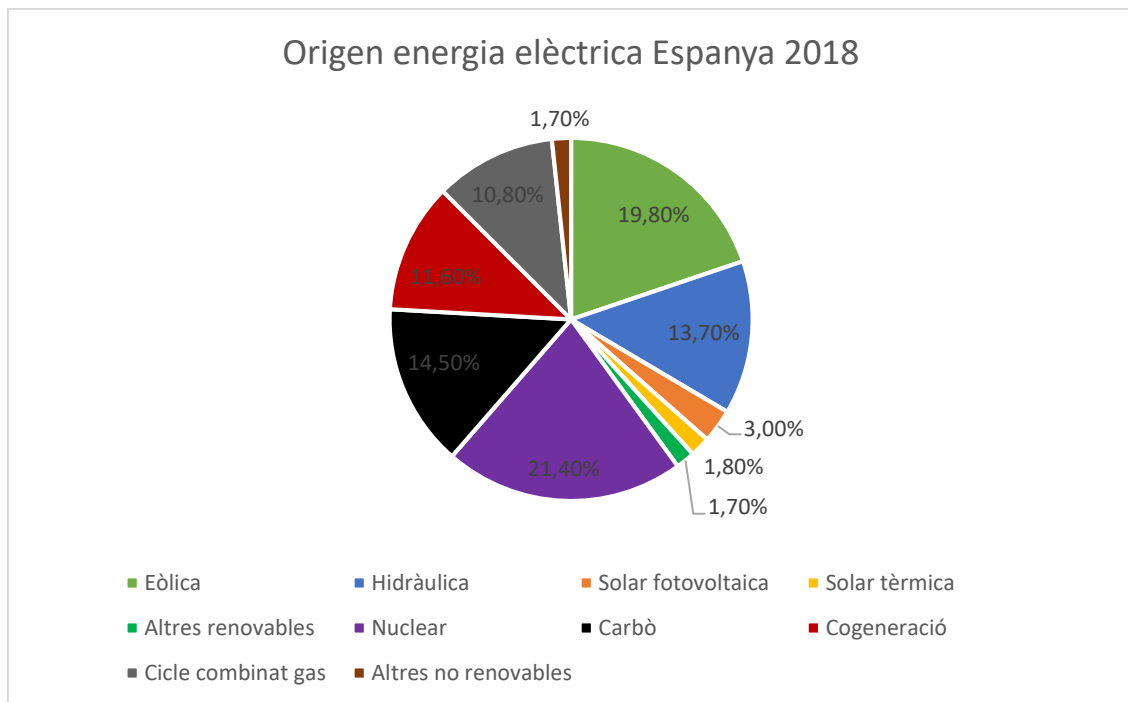


Figura 18 . Origen de l'energia elèctrica d'Espanya. Març 2018. Font: (57)

Els vehicles elèctrics, tant els recarregables com els de pila de combustible d'hidrogen, implicaran un gran increment de la demanda elèctrica actual. Si avui en dia no es pot cobrir la demanda elèctrica amb energies renovables, la introducció dels vehicles elèctrics a gran escala suposaria l'ús de combustible fòssils per satisfer la demanda que requeririen.

Per aquest motiu, des d'un punt de vista realista, els vehicles elèctrics seran verdaderament respectuosos amb el medi ambient quan es pugui subministrar la demanda elèctrica mitjançant energies netes, donat que si, d'un dia per l'altre, la demanda elèctrica s'eleva en gran mesura, hauran de dependre d'energies de fonts contaminants.



Una central tèrmica que utilitza combustibles fòssils, en general, té un rendiment més elevat que un vehicle de combustió interna. Igualment, un vehicle elèctric té també un major rendiment, el que significa que si tot el parc automobilístic fos de vehicles elèctrics i l'energia de tots aquests es subministrés mitjançant centrals tèrmiques, hi hauria una disminució de la quantitat global de combustible fòssil a utilitzar. Dit això, seria un sense sentit desfer-nos de vehicles que encara tenen vida útil perquè es generaria una gran quantitat de residus. A més, la fabricació de nous vehicles elèctrics tindria un impacte, tan energètic com mediambiental, el que, a dia d'avui, faria inviable cobrir el requeriment energètic que implicaria.

D'altra banda, el procés energètic que engloba la posada en marxa dels vehicles elèctrics de pila de combustible d'hidrogen requereix una major quantitat elèctrica que el dels vehicles elèctrics recarregables, com s'ha vist en l'apartat 6.1. *ESTUDI ENERGÈTIC*. A nivell mediambiental, si tota l'energia fos d'origen renovable la diferència entre les dos alternatives seria petita, el problema és que en un inici no seria així.

Així mateix, s'ha de tenir en compte que l'electròlisi de l'aigua i el vehicle requereixen aigua, però, com s'ha vist en el esquema del capítol 6. *VIABILITAT*, l'aigua que necessita el vehicle es pot subministrar a partir de la pròpia que produeix el vehicle i de la provinent del reciclatge de l'hidròxid de magnesi, si bé, en el procés de l'electròlisi, per produir cada quilogram d'hidrogen es requereix 8,95 litres d'aigua com s'ha calculat en el apartat 9. *ANNEXES*. Així, en l'hipotètic cas que tots els vehicles d'Espanya fossin d'hidrogen i que tots els vehicles consumissin 0,79 kg H₂/ 100 km, sabent que el parc automobilístic és de 30.366.603 vehicles en circulació (58) i que cadascú fa una mitjana anual de 9126 km (59) , els litres d'aigua que consumirien els vehicle en un dia seria:

$$30.366.603 \text{ vehicles} \cdot \frac{9126 \text{ km}}{1 \text{ vehicle} \cdot \text{any}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{365 \text{ dies}} \cdot \frac{8,95 \text{ l H}_2\text{O}}{1 \text{ kg H}_2} \cdot \frac{0,79 \text{ kg H}_2}{100 \text{ km}} = 53.682.649 \frac{\text{l H}_2\text{O}}{\text{dia}}$$

Així, si tots els vehicles d'Espanya fossin de pila d'hidrogen, es requeririen 53.682 m³ d'aigua diàriament. Per donar una idea del consum que significa, com que cada persona diàriament consumeix 137 litres d'aigua d'ús domèstic (59), és com si a Espanya haguessin 221.654 habitants més, fet que suposaria un consum viable sense gairebé impacte, donat que la població espanyola és d'uns 47 milions d'habitants.



A primera vista, després del comentat, els vehicles elèctrics recarregables semblen ser la millor opció, ja que requereixen menor energia i no tenen res de consum d'aigua. En la realitat no acaba de ser així, ja que s'han de tenir en compte els residus que generen les seves grans bateries i que podrien suposar una problemàtica en un futur.

Les bateries utilitzades avui en dia en els vehicles elèctrics recarregables són les d'ió de liti, que estan permetent aconseguir autonomies més amples i molt bones prestacions. El principal problema que presenten es que tenen una vida útil d'uns 150.000 km, el que representa la necessitat de dos bateries per satisfer la vida útil del vehicle. Actualment, el procés de reciclatge recicla el 75% de la massa total de la bateria, provocant que el 25% restant representi una gran quantitat de generació de residus altament contaminants, al ser aquestes bateries de grans dimensions.

Les bateries d'ió de liti contenen com a elements principals liti i cobalt. A data d'avui, les reserves totals de liti són de 13,5 milions de tones. Cal destacar que aquest element és molt utilitzat en el món d'electrònica, per aquest motiu, no es podria destinar tota la extracció de liti al món de l'automoció. En l'hipotètic cas de que es destinessin totes les reserves de liti per a la fabricació de vehicles elèctrics recarregables amb bateries de 90kWh (bateries amb uns 600km d'autonomia), al requerir cadascuna uns 18 kg de liti, només es podrien arribar a produir uns 750 milions de vehicles. En una situació de producció a gran escala de 80 milions de vehicles elèctrics recarregables anuals, el liti s'esgotaria en uns 9 anys, sense contemplar que els vehicles en ús haurien de canviar la bateria i reciclar-la. En el cas del cobalt, les circumstàncies són encara pitjors donat que és un element encara menys abundant. (60)

Tot i que els vehicles elèctrics recarregables són una gran alternativa a tenir en compte donat el seu alt rendiment del procés global energètic, les seves bateries presenten una gran problemàtica pel motiu comentat anteriorment. Per aquesta raó, s'haurà de plantejar la utilització de materials abundants en el nostre planeta per a la fabricació de les bateries, com podria ser el potassi, el sodi o el magnesi que també presenten baixes energies de ionització, igual que el liti.



6.3. ESTUDI ECONÒMIC

Actualment, els vehicles de pila de combustible d'hidrogen que estan en el mercat tenen un preu de venda entre uns 54.000-70.000€. El preu és elevat donat que la producció no és a gran escala, fet que fa encarir els diferents components del vehicle, apart que té una inversió molt alta d'investigació, encara per cobrir.

Un exemple és el Honda FCV que té un preu de 60.700€ al Japó. Les característiques del vehicle que ens poden interessar per tenir una idea del cost són les següents (61):

- Motor sincrònic de CA 130 kW/4501-9028 rpm (174 cv)
- Pila de combustible d'electròlit polimèric de 103 kW
- Bateria d'ió de liti de 1,8 kWh
- Dipòsit d'hidrogen comprimit de 700 bar de 141 l.

La pila de combustible i els dipòsits d'hidrogen són uns dels components més cars del vehicle. Als fabricants, la pila de combustible els hi surt per un cost aproximat d'uns 11.000€ (62) i els dipòsits, que acostumen a ser dos, d'uns 1.300€ cadascú. Els motors són més econòmics que els de combustió interna i la bateria és relativament petita amb un cost que no arriba als 500€, tot i ser de liti.

Avui en dia, en el món de les piles de combustible s'està investigant per reduir els costos de producció, a través de rebaixar la quantitat d'alguns materials costosos que s'estan utilitzant, com és el cas del platí. Diversos estudis econòmics, partint d'una producció a gran escala, arriben a la conclusió sobre la possibilitat de poder obtenir les piles a preus assequibles, com es pot veure a continuació:

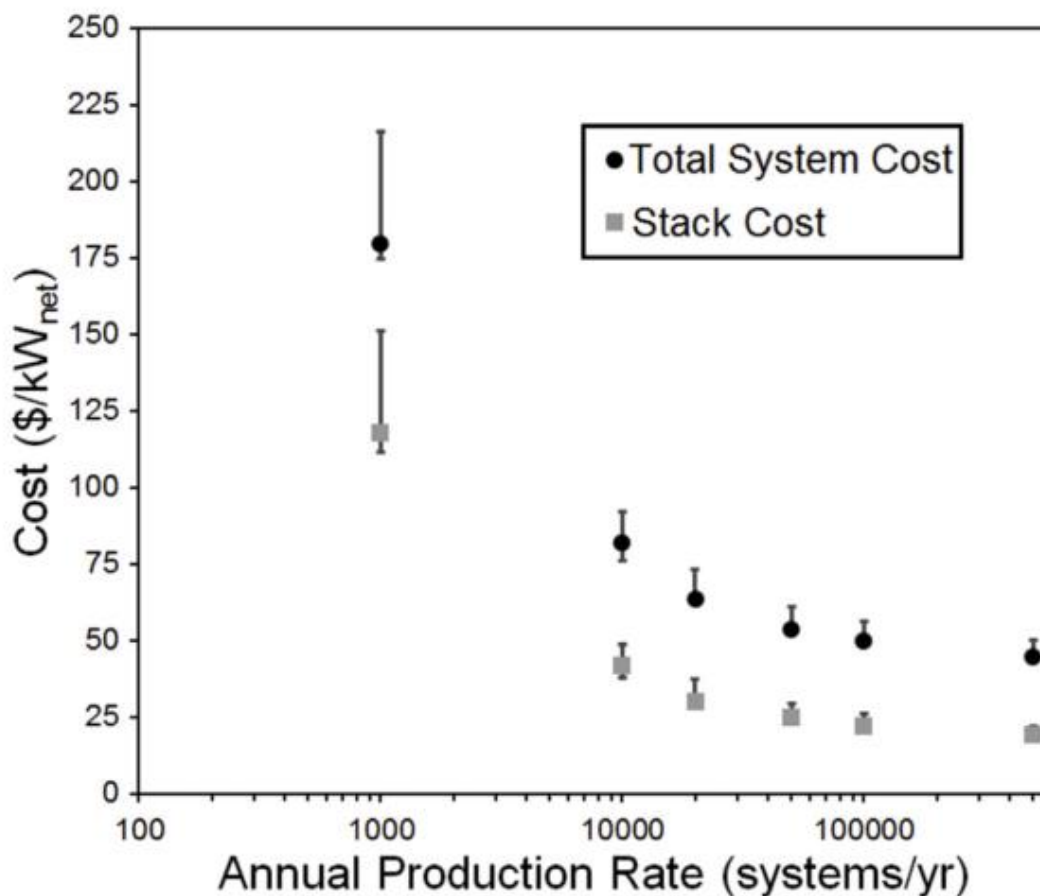


Figura 19. Cost del kW d'una pila de combustible d'hidrogen en funció de la producció anual. Font: (62)

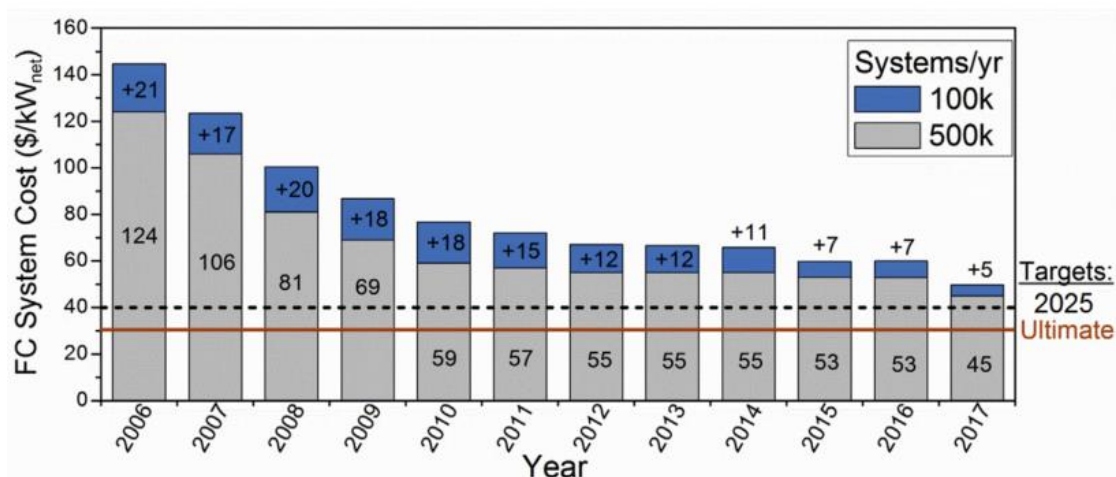


Figura 20. Cost del kW d'una pila de combustible d'hidrogen en funció dels anys i la producció anual. Font: (62)



El primer gràfic ens demostra que com més unitats es fabriquin en cadena menor serà el cost de cada pila d'hidrogen. En el segon, en canvi, el cost de fabricació de la pila a l'any 2025, per una producció de 500.000 unitats, seria d'uns 40\$ cada kW (35,6€ el kW), podent arribar en un futur a un cost límit de 30\$ el kW (26,7€ el kW), el que vol dir que per l'Honda FCV, comentat anteriorment, el cost de la seva pila de combustible de 103 kWh seria de 3.691€ al 2025 i de 2.768€ posteriorment.

Com qualsevol component d'un vehicle, la fabricació massiva dels dipòsits d'hidrogen fa que disminueixi el preu per unitat, com es pot veure a continuació:

Tanc d'hidrogen comprimit de 700 bar tipo IV amb 64,40 litres						
Tancs/anuals	1.000	10.000	30.000	80.000	100.000	500.000
\$/tanc	1.289\$	758\$	717\$	668\$	643\$	629\$

Taula 14. Preu d'un tanc d'hidrogen comprimit de 700 bar tipo IV amb 64,40 litres, en funció de la producció anual. Font: (63)

Per a que el vehicle tingui una autonomia d'uns 800 quilometres, emprant hidrogen comprimit com a combustible, haurà de disposar de dos dipòsits. Però com que el model que s'ha plantejat en el nostre estudi de viabilitat és emmagatzemar hidrur de magnesi i aigua com a combustible, en comptes d'hidrogen comprimit, al ser aquests sòlid i líquid respectivament, els dipòsits, a diferència dels que s'usen avui en dia, no tenen cap complexitat sent el preu de fabricació econòmic.

Com s'ha comentat al llarg de l'estudi, la diferència entre un vehicle elèctric recarregable i un de pila de combustible d'hidrogen és que el primer requereix una bateria de gran capacitat energètica mentre que el d'hidrogen, una pila de combustible, els dipòsits i una bateria de poca capacitat energètica. La resta del vehicle és exactament igual en els dos casos. La comparació econòmica entre tots dos es farà a partir dels components comentats.



Segons estudis realitzats per la universitat *Vrije Universiteit Brussel*, al 2025, les bateries d'ió de liti tindran el mínim cost de producció, de 100\$/kWh (64). Si es pren d'exemple el BMW i3, que utilitza una bateria de 42,2 kWh i té una autonomia de 260 km, el cost de la bateria al 2025 serà de 3.760€. Com que el vehicle, al llarg de la seva vida útil, utilitzarà dos, el cost total serà de 7520€. En canvi, la pila d'hidrogen del Honda FCV, com s'ha comentat anteriorment, al 2025 podria tenir un cost de 3.691€, els dipòsits simples que emmagatzemarien l'hidrur de magnesi, que s'han proposat en aquest capítol, tindrien un cost de fabricació d'uns 20€ a diferència dels que emmagatzemen hidrogen comprimit i la bateria d'ió de liti que utilitzaria, al ser de 1,8 kWh i partint d'un preu de 100\$/kWh com en el cas anterior, tindria un cost d'uns 160€, si bé, a l'igual que en el cas del recarregable, utilitzarà dos al llarg de la vida útil del vehicle, sumant així 320€. Els tres components del vehicle d'hidrogen sumen un cost total de 4.031€.

Pel que fa al cost del combustible es parteix de que el preu del kWh a Espanya és de 0,12€ (65) (mitjana entre la tarifa nocturna i la d'hores punta), per tant el vehicle recarregable, al consumir 23,38 kWh/100 km, si recorre 20.000 km anuals, el cost serà de 561,12€/any (2,81€/100km). En canvi, el d'hidrogen consumeix 43,19 kWh/100 km, per tant el cost de l'energia per un vehicle que també fa 20.000 km/any serà de 1.036,56€/anuals. Però, a diferència del recarregable, el vehicle d'hidrogen té una despesa d'aigua a l'hora de produir el combustible. Un quilogram d'hidrogen requereix 8,95 litres d'aigua destil·lada, si el vehicle consumeix 0,79 kg H₂/ 100 km, voldrà dir que gastarà 7,07 litres H₂O/ 100 km. Sabent que el preu del litre d'aigua destil·lada a escala industrial és d'uns 0,10€, el cost de l'aigua que consumirà la producció d'hidrogen és de 141,40€/anuals. El cost total del combustible d'hidrogen equivaldrà a 1.177,96€/anuals (5,89€/100km).

V. E. DE PILA DE COMBUSTIBLE D'HIDROGEN (800 km d'autonomia)	V. E. RECARREGABLES (260km d'autonomia)
COST VEHICLE	
Vehicle elèctric (X€) + Pila de combustible (3.691€) + Bateria (160€) + Dipòsits (20€) = X + 3.871 €	Vehicle elèctric (X€) + Bateria (3.760€) = X + 3.760 €
PREU COMBUSTIBLE ALS 100Km	
Energia (5,18€) + Aigua destil·lada (0,71€) = 5,89€	Energia (2,81€) = 2,81€
EXTRAS DEL VEHICLE ALS 150.000Km	
Bateria (160€) = 160€	Bateria (3.760€) = 3.760€

Taula 15. Comparació del cost del V.E. Recarregable amb el V.E. de Pila de Combustible d'Hidrogen.
Font: Pròpia

A partir dels components analitzats entre un vehicle elèctric recarregable amb una bateria de 42 kWh (260 km autonomia) i el vehicle de pila d'hidrogen, es conclou que al 2025 els dos vehicles tindran un preu de venda pràcticament igual. Però el fet de que en el vehicle elèctric recarregable s'haurà de canviar la bateria als 150.000 km, representarà un cost afegit important, al ser aquestes tan elevades de preu. Pel que fa al consum de combustible, el vehicle d'hidrogen tindrà un cost 2,1 vegades major que el recarregable.

Si se suposa que els dos vehicles tenen una vida útil de 260.000 km, el recarregable de 42 kWh, entre el cost de les bateries i el preu de l'energia total que utilitzarà al llarg de la vida útil del vehicle, sumarà un cost total de 14.770,56€. Mentre que el d'hidrogen, comptant el cost del combustible que utilitzarà, la pila de combustible, els dipòsits i la bateria, sumarà un total de 19345,00€.

Com es pot veure, l'estalvi total d'un vehicle elèctric amb una bateria de 42 kWh es de 4.574,44€ al llarg de la vida útil del vehicle, però té l'inconvenient de que l'autonomia és de només 260 km. Si es vol ampliar aquesta, s'hauran d'utilitzar bateries amb més capacitat energètica, fet que implicarà major cost i dimensió d'aquestes, i major pes i consum del vehicle. A continuació, en el següent gràfic, es representa l'evolució del cost tant de les bateries com de l'energia que consumeix un vehicle elèctric recarregable al llarg de la seva vida útil en funció de l'autonomia (no es té en compte l'increment del pes i de la dimensió de la bateria en el gràfic).

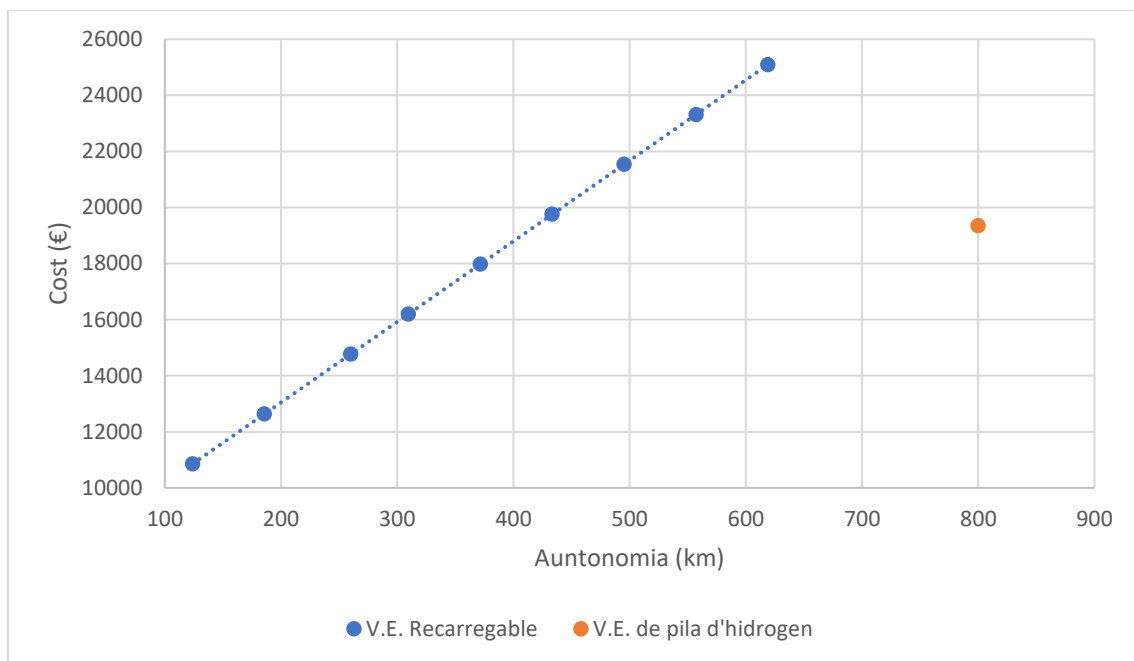


Figura 21. Cost dels components característics i del combustible utilitzats al llarg de la vida útil del vehicle elèctric en funció de l'autonomia. Font: Pròpia

Com es pot veure, un vehicle elèctric recarregable que tingui una autonomia de 417 km tindrà el mateix cost total dels components i del combustible que utilitzarà al llarg de la seva vida útil, que un vehicle de pila d'hidrogen amb una autonomia de 800 km.



6.4. VIABILITAT A GRAN ESCALA

A partir del model proposat al començament del capítol 6. *VIABILITAT*, el procés de viabilitat dels vehicles elèctrics de combustible d'hidrogen serà lent, tal com s'ha explicat en el apartat 6.2. *ESTUDI MEDIAMBIENTAL*, donat que la introducció d'aquests vehicles haurà d'anar acompanyada d'una gran inversió en la producció d'energies d'origen renovable, per tal de cobrir la demanda elèctrica de manera sostenible.

Quant a la producció de l'hidrogen necessari per cobrir la demanda que implicarà la posada en marxa dels vehicles a gran escala, requerirà d'una inversió econòmicament alta per a la creació de centrals productores d'aquest element a partir de mètodes sostenibles com l'electròlisi de l'aigua o la gasificació de la biomassa, així com per a la investigació destinada a millorar els rendiments dels processos.

L'emmagatzematge i el transport de l'hidrogen a partir de la utilització del magnesi donarà una gran viabilitat al vehicle d'hidrogen dins del món de l'automoció, tant a nivell econòmic com a nivell de seguretat, tal i com s'ha pogut veure en el capítol 5. *EMMAGATZEMATGE I TRANSPORT DE L'HIDROGEN*.

A nivell mediambiental els vehicles no emetran gasos contaminants i els residus que generin seran completament reciclats (com és el cas de l'hidròxid de magnesi), utilitzant l'energia que requereixi el procés de fonts d'origen renovables, sent així una alternativa sostenible amb el medi ambient.

Com s'ha vist en l'apartat 6.3 *ESTUDI ECONÒMIC*, certs components, que ara incideixen en el preu d'adquisició del vehicle, podran en un futur immediat de 5 a 6 anys reduir el seu cost de producció. D'aquesta manera, al llarg dels anys, si la producció d'aquests vehicles es fa en massa es podran treure vehicles amb una gama de preus similars als actuals. Quant al combustible, el preu serà semblant al de la gasolina. En uns anys, qualsevol persona que tingui avui dia un automòbil, podrà accedir a l'adquisició d'un vehicle d'hidrogen.

7. CONCLUSIÓ

El vehicle elèctric de pila de combustible d'hidrogen és una gran alternativa a tenir en compte en un futur, si bé actualment no seria viable portar la seva producció a gran escala, ja que, al requerir un consum energètic elevat, no es podria satisfer la demanda elèctrica necessària, fet que implicaria l'ús de combustibles fòssils per cobrir-la.

L'hidrogen es presenta com una alternativa als vehicles propulsats per combustibles fòssils, per aquest motiu, la producció de l'hidrogen ha de minimitzar la dependència d'aquests utilitzant mètodes de producció que depenguin de fonts renovables, com el de l'electròlisi de l'aigua, i invertint, al mateix temps, en energies de fonts renovables per subministrar una energia neta per a la seva producció.

La principal dificultat que presenta aquesta alternativa és la dificultat i la perillositat d'emmagatzemar i transportar l'hidrogen a partir de mètodes físics. És per aquesta raó que s'ha proposat la utilització del magnesi que, a través de la hidrogenació d'aquest element, s'aconsegueix l'hidrur de magnesi que a pressió i temperatura ambient es presenta sòlid, eliminant la dificultat i perillositat que implica actualment el seu emmagatzematge.

Els vehicles d'hidrogen avui en dia presenten preus elevats, però gràcies a la inversió en investigació i desenvolupament, en pocs anys, s'aconseguirà, mitjançant una producció massiva dels components, uns preus competitius en comparació als dels vehicles de combustió interna.



El vehicle elèctric recarregable, el principal competidor del d'hidrogen, té l'avantatge de consumir menys electricitat, però també l'inconvenient de tenir autonomies limitades, fet que es pot solucionar amb bateries d'ió de liti que tinguin gran capacitat d'emmagatzematge d'energia. La producció a gran escala d'aquestes bateries esgotarien en pocs anys els materials necessaris per a la seva elaboració, així com els residus resultants suposarien un gran impacte mediambiental. Per aquest motiu, s'haurà d'investigar en la recerca d'altres materials per fabricar-les si, en un futur, volen tenir viabilitat i continuar competint amb els vehicles d'hidrogen.

8. REFERÈNCIES

- (1) Hilario López, J. Hay que reducir las emisiones de CO2. A: *elMundo*. 2015, [Consulta: 21 febrer 2019]. Disponible a: https://www.elmundo.com/portal/opinion/columnistas/hay_que_reducir_las_emisiones_de_co2.php#.XOWUBMgzZEY.
- (2) 9 efectos del humo de los coches sobre tu salud. A: *CUERPOMENTE*. 2018. [Consulta: 21 febrer 2019]. Disponible a: https://www.cuorpomente.com/ecologia/medio-ambiente/efectos-humo-coches-salud_2046.
- (3) La Torre, A. Todos los coches híbridos del mercado. A: *autopista.es*. 2018. [Consulta: 15 maig 2019]. Disponible a: <https://www.autopista.es/novedades-coches/articulo/todos-los-coches-hibridos-del-mercado>.
- (4) Todos los coches eléctricos del mercado: guía de compra. A: *Autopista.es*. 2018. [Consulta: 15 maig 2019]. Disponible a: <https://www.autopista.es/moove/articulo/todos-los-coches-electricos-del-mercado-guia-de-compra>.
- (5) Fidalgo, R. Qué coches se venden en España con Autogás GLP de fábrica. A: *Autocasión*. 2018. [Consulta: 15 maig 2019]. Disponible a: <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/que-coches-se-venden-en-espana-con-autogas-glp-de-fabrica>.
- (6) Todos los coches de gas natural GNC del mercado: guía de compra. A: *Autopista.es*. 2018. [Consulta: 15 maig 2019]. Disponible a: <https://www.autopista.es/moove/articulo/todos-los-coches-de-gas-natural-gnc-del-mercado-guia-de-compra>.
- (7) Hydrogen vehicle. A: *Wikipedia*. 2019. [Consulta: 21 febrer 2019]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_vehicle.
- (8) Vilaseró, M. El fin del diésel y la gasolina ya tiene fecha en España: 2040. A: *elPeriódico*. 2018, [Consulta: 25 febrer 2019]. Disponible a: <https://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20181113/espana-prohibira-matriculacion-coches-diesel-gasolina-hibridos-desde-2040-7143700>.
- (9) G. Corral, M. Así será la ley que quiere acabar con los coches diésel, gasolina e híbridos. A: *ELMUNDO*. 2018, [Consulta: 25 febrer 2019]. Disponible a: <https://www.elmundo.es/papel/historias/2018/11/13/5beb015de5fdea4f708b45c1.html>.
- (10) Fernandez, A. Lista de países que quieren prohibir los coches diésel y gasolina. A: *Motor.es*. 2017, [Consulta: 25 febrer 2019]. Disponible a: <https://www.motor.es/noticias/que-paises-prohibiran-coches-diesel-gasolina-201741744.html>.
- (11) Fersainz, R. Mecánica básica: ¿cómo funciona un motor de coche? A: *AutoBild*. 2016. [Consulta: 28 febrer 2019]. Disponible a: <https://www.autobild.es/practicos/como-functiona-motor-coche-286423>.
- (12) Baeza, M. Los combustibles más energéticos. A: *ElPaís*. 2012, [Consulta: 2 març 2019]. Disponible a: <https://blogs.elpais.com/coche-electrico/2012/12/los-combustibles-mas-energeticos.html>.
- (13) Ibañez, P. El motor de combustión es el más eficiente: FALSO. A: *Motorpasión*. 2012. [Consulta: 23 febrer 2019]. Disponible a: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/el-motor-de-combustion-es-el-mas-eficiente-hoy-falso>.
- (14) Pulkrabek, W.W. *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Prentice Hall, 1997. ISBN 9780135708545.

- (15) Dalmau, J. ¿Diesel, Gasolina, Híbrido, GLP o Gas Natural? Energías Alternativas. A: . Spain: Coches.net, 2018. [Consulta: 2 març 2019]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=o2Ec4HcPaR8>.
- (16) Motores de combustión interna. A: *Wikipedia* . 2019. [Consulta: 28 febrer 2019]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_combustión_interna.
- (17) Biogas. A: *Wikipedia* . 2019. [Consulta: 3 març 2019]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/Biogas>.
- (18) Las ventajas y desventajas del biogas. A: *Escuelapedia* . [Consulta: 5 març 2019]. Disponible a: <http://www.escuelapedia.com/las-ventajas-y-desventajas-del-biogas/>.
- (19) Lu, L. et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. A: *Journal of Power Sources* . 2013, Vol. 226, p. 272-288. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2012.10.060. [Consulta: 22 maig 2019]. Disponible a: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775312016163>.
- (20) Coche eléctrico, automóvil eléctrico. A: *Aficionados a la mecánica* . 2017. [Consulta: 5 març 2019]. Disponible a: <http://www.aficionadosalamecanica.com/coche-electrico.htm>.
- (21) Ayala, D. ¿Cómo funciona un coche eléctrico? A: . Spain: 2014. [Consulta: 5 març 2019]. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=ZvPNDGAvDi4>.
- (22) Pérez, A. ¿Cómo funciona un motor eléctrico? A: *AutoBild* . 2018. [Consulta: 13 març 2019]. Disponible a: <https://www.autobild.es/noticias/como-funciona-motor-electrico-186528>.
- (23) Basarte Lorente, J.F. et al. *Química I Batxillerat*. Barcelona: 2008. ISBN 978-84-236-9091-6.
- (24) ¿Cómo son las baterías de los coches eléctricos? A: *Race* . 2019. [Consulta: 7 març 2019]. Disponible a: <https://www.race.es/como-son-baterias-coches-electricos>.
- (25) ¿Conoces los tipos de coches híbridos que existen? A: *Toyota* . [Consulta: 8 març 2019]. Disponible a: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/2017/conoces-tipos-coches-hibridos-existen>.
- (26) Timeline: History of the electric car. A: *PBS* . Public Broadcasting Service, 2009, [Consulta: 10 març 2019]. Disponible a: <http://www.pbs.org/now/shows/223/electric-car-timeline.html>.
- (27) History of the electric vehicle. A: *Wikipedia* . 2019. [Consulta: 13 març 2019]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle%09%09.
- (28) El primer vehículo de hidrógeno cumple 50 años. A: *SoyMotor* . 2016. [Consulta: 11 març 2019]. Disponible a: <https://soymotor.com/coches/noticias/el-primer-vehiculo-de-hidrogeno-cumple-50-anos-925413>.
- (29) Notter, D.A. et al. Life cycle assessment of PEM FC applications: electric mobility and μ -CHP. A: *Energy & Environmental Science* . 2015, Vol. 8, núm. 7, p. 1969-1985. ISSN 1754-5692. DOI 10.1039/C5EE01082A. [Consulta: 14 març 2019]. Disponible a: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5EE01082A>.
- (30) Val, E. Y ahora, el coche de hidrógeno. A: *LA VANGUARDIA* . 2018, [Consulta: 10 març 2019]. Disponible a: <https://www.lavanguardia.com/ocio/motor/20181016/452381690931/coche-hidrogeno-combustible.html>.
- (31) Reyes, L. Pila de combustible de hidrógeno: Funcionamiento. A: *Automoción* . 2015, [Consulta: 14 març 2019]. Disponible a: <https://www.autonocion.com/la-pila-de-combustible-de-hidrogeno-esta-de-moda-pero-sabes-como-funciona/>.
- (32) Combustible, A.E. de pilas de. ¿Sabías que las membranas GORE-SELECT® admiten la pila de pilas de combustible del vehículo de Sunrise Power en más de 5000 horas de operación confiable? A: *APPICE* . 2018. [Consulta: 19 maig 2019]. Disponible a: <https://appice.es/sabias-que-las-membranas-gore-select-admiten-la-pila-de-pilas-de-combustible-del-vehiculo-de-sunrise-power-en-mas-de-5000-horas-de-operacion-confiable/>.



- (33) Ibañez, S. El hidrógeno, la asignatura pendiente. A: *elPaís* . 2018. [Consulta: 16 març 2019]. Disponible a: https://elpais.com/economia/2018/04/18/actualidad/1524064922_785216.html.
- (34) Sinopsis del crecimiento mundial de las estaciones de servicio de hidrógeno. A: *Petrolplaza* . 2019. [Consulta: 16 març 2019]. Disponible a: <https://www.petrolplaza.com/news/10353>.
- (35) Ewan, B.C.R. i Allen, R.W.K. A figure of merit assessment of the routes to hydrogen. A: *International Journal of Hydrogen Energy* . Pergamon, 2005, Vol. 30, núm. 8, p. 809-819. ISSN 0360-3199. DOI 10.1016/J.IJHYDENE.2005.02.003. [Consulta: 5 abril 2019]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905000364>.
- (36) F. Brown, L. A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuel-cell-powered automobiles. A: *International Journal of Hydrogen Energy* . Pergamon, 2001, Vol. 26, núm. 4, p. 381-397. ISSN 0360-3199. DOI 10.1016/S0360-3199(00)00092-6. [Consulta: 9 abril 2019]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319900000926>.
- (37) Herraiz Cardona, I. *Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de Hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua* . UPV, 2012. DOI 10.1016/j.ijhydene.2012.04.100. [Consulta: 8 abril 2019]. Disponible a: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16804/tesisUPV3881.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- (38) Dutta, S. Technology assessment of advanced electrolytic hydrogen production. A: *International Journal of Hydrogen Energy* . Pergamon, 1990, Vol. 15, núm. 6, p. 379-386. DOI 10.1016/0360-3199(90)90194-4. [Consulta: 10 abril 2019]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360319990901944>.
- (39) Paddison, S.J. Proton Conduction Mechanisms at Low Degrees of Hydration in Sulfonic Acid-Based Polymer Electrolyte Membranes. A: *Annual Review of Materials Research* . Annual Reviews 4139 El Camino Way, P.O. Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, 2003, Vol. 33, núm. 1, p. 289-319. DOI 10.1146/annurev.matsci.33.022702.155102. [Consulta: 11 abril 2019]. Disponible a: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.matsci.33.022702.155102>.
- (40) Han, S.-D. et al. ChemInform Abstract: Developments of Water Electrolysis Technology by Solid Polymer Electrolyte. A: *ChemInform* . 2010, Vol. 33, núm. 15, p. no-no. DOI 10.1002/chin.200215283. [Consulta: 11 abril 2019]. Disponible a: <http://doi.wiley.com/10.1002/chin.200215283>.
- (41) Yan, X.L. i Hino, R. *Nuclear Hydrogen Production Handbook* . Tokyo: CRC Press, 2011. ISBN 9781439810842. [Consulta: 10 abril 2019]. Disponible a: https://books.google.es/books?id=FUF-fjIK_CEC&pg=PR7&lpg=PR7&dq=thermochemical+decomposition+of+water+yan+xing+ryutaro+hino&source=bl&ots=3AgTVrh4U&sig=ACfU3U1gQLqIpMHxZuFyRIsSGMNXFTpG0w&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiyYzSv7KriAhVYAmMBHWx_CiYQ6AEwAXoECACQAQ#v=on.
- (42) Fàbrega Ramos, M. *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna* . Universitat Politècnica de Catalunya, 2009. [Consulta: 13 febrer 2019]. Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6533>.
- (43) Tretsiakova, S. i Makarov, D. *Safety of hydrogen storage* . Ulster University, 2016. [Consulta: 21 març 2019]. Disponible a: http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Safety_of_hydrogen_storage_notes.pdf.
- (44) Santiago, O. Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques. A: *Apilados* . 2017. [Consulta: 21 març 2019]. Disponible a: <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>.
- (45) Leachman, J.W., Jacobsen, R.T. i Lemmon, E.W. Saturation Properties for Hydrogen. A: . 2018. [Consulta: 21 març 2019]. Disponible a: https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?Action=Load&ID=C1333740&Type=SatT&Digits=5&PLOW=.5&PHIGH=1.5&PINC=.1&RefState=DEF&TUnit=K&PUnit=atm&DUnit=kg/m3&HUnit=kJ/mol&WUnit=m/s&VisUnit=uPa*s&STUnit=N/m.

- (46) Kunze, K. i Kircher, O. CRYO-COMPRESSED HYDROGEN STORAGE CRYOGENIC CLUSTER DAY. A: . 2012. [Consulta: 21 març 2019]. Disponible a: <https://stfc.ukri.org/stfc/cache/file/F45B669C-73BF-495B-B843DCDF50E8B5A5.pdf>.
- (47) Toyota Mirai. A: *Wikipedia* . 2014. [Consulta: 21 març 2019]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai.
- (48) Ho, Y.-H. *Hydrogen Generation from Magnesium Hydride By Using Organic Acid* . University of Wisconsin Milwaukee, 2013. [Consulta: 28 març 2019]. Disponible a: <http://dc.uwm.edu/etd>.
- (49) Soriano Gómez, L. *Pilas de combustible y sistemas de almacenamiento o generación de hidrógeno para propulsión de aeronaves no tripuladas (UAVs) eléctricas de gran autonomía* . UPM, 2016. [Consulta: 28 març 2019]. Disponible a: http://oa.upm.es/43480/1/TFG_LEONARDO_SORIANO_GOMEZ.pdf.
- (50) David, W.I.F. et al. Hydrogen Production from Ammonia Using Sodium Amide. A: *Journal of the American Chemical Society* . American Chemical Society, 2014, Vol. 136, núm. 38, p. 13082-13085. DOI 10.1021/ja5042836. [Consulta: 31 març 2019]. Disponible a: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja5042836>.
- (51) Mohajeri, N. i T-Raissi, A. Regeneration of Ammonia-Borane Complex for Hydrogen Storage. A: *MRS Proceedings* . 2005, Vol. 884, p. GG1.4. DOI 10.1557/PROC-884-GG1.4. [Consulta: 31 març 2019]. Disponible a: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S194642740011468X.
- (52) Quarles, P. ACCELERATING THE HYDROGEN ECONOMY - ASEMBLON'S HYDRNOL CARRIER. A: . Redmond: 2009. [Consulta: 2 abril 2019]. Disponible a: www.aseblon.com.
- (53) Hyundai Nexi. A: *Wikipedia*. 2019. [Consulta: 4 abril 2019]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Hyundai_Nexo
- (54) Tesla Model S. A: *Motor K* . 2016. [Consulta: 4 abril 2019]. Disponible a: <https://motork.com/coches-electricos-segunda-mano/tesla-model-s-75d-autopilot-blanco-premium-techo>.
- (55) Patiño, M.Á. 8 de cada 100 kilovatios de electricidad se pierden o se roban en España, Empresas Sector Energía. A: *Expansión* . 2012, [Consulta: 6 abril 2019]. Disponible a: <http://www.expansion.com/2012/12/14/empresas/energia/1355500914.html>.
- (56) Clavero, D. La eficiencia durante la recarga: no todo lo que pagas se convierte en autonomía. A: *Diariomotor* . 2014. [Consulta: 4 abril 2019]. Disponible a: <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2014/08/04/la-eficiencia-durante-la-recarga-no-todo-lo-que-pagas-se-convierte-en-autonomia/>.
- (57) Fernández Munguía, S. Generación eléctrica en España: marzo de 2018. A: *Diario Renovable* . 2018. [Consulta: 8 abril 2019]. Disponible a: <https://www.diariorenovables.com/2018/04/generacion-electrica-en-espana-marzo-de.html>.
- (58) El parque automovilístico sigue creciendo: casi 31 millones de vehículos circulan por nuestras carreteras. A: *ABC* . 2018, [Consulta: 9 abril 2019]. Disponible a: https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-parque-automovilistico-sigue-creciendo-casi-31-millones-vehiculos-circulan-nuestras-carreteras-201806051401_noticia.html.
- (59) Los españoles reducen el uso del coche y hacen menos de 10.000 km al año. A: *HERALDO* . 2014, [Consulta: 9 abril 2019]. Disponible a: https://www.heraldo.es/noticias/economia/2014/07/06/los_espanoles_reducen_uso_del_coche_hacen_menos_000_ano_297970_309.html.
- (60) ¿Hay litio suficiente para tanto coche eléctrico? A: *La Vanguardia* . 2016, [Consulta: 20 abril 2019]. Disponible a: <https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20160821/404051225771/litio-suficiente-coche-electrico.html>.
- (61) Reyes, L. Honda le pone precio al vehículo de hidrógeno. A: *Autonoción* . 2016, [Consulta: 21 abril 2019]. Disponible a: <https://www.autonocion.com/honda-le-pone-precio-al-vehiculo-de-hidrogeno-te-sigue-pareciendo-rematadamente-carro/>.



(62) Thompson, S.T. et al. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook. A: *Journal of Power Sources* . 2018, Vol. 399, núm. 0378-7753, p. 304-313. DOI 10.1016/j.jpowsour.2018.07.100. [Consulta: 23 abril 2019]. Disponible a: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100>.

(63) James, B.D. i Houchins, C. 2018 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review Hydrogen Storage Cost Analysis. 2018. [Consulta: 22 abril 2019]. Disponible a: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review18/st100_james_2018_o.pdf.

(64) Berckmans, G. et al. Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. A: *Energies* . Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017, Vol. 10. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en10091314. [Consulta: 30 abril 2019]. Disponible a: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1314>.

(65) Precio del kWh en 2019: Endesa, Iberdrola, EDP, Podo y Lucera. A: *Tarifasgasluz* . 2019. [Consulta: 30 abril 2019]. Disponible a: <https://tarifasgasluz.com/faq/precio-kwh>.

(66) Haynes, W.M., Lide, D.R. i Bruno, T.J. CRC handbook of chemistry and physics. A : CRC press, 2017. ISBN 9781498754293. [Consulta: 24 abril 2019]. Disponible a: https://discovery.upc.edu/iii/encore/record/C__Rb1499177__Shandbook of chemistry and physics__Orightresult__U__X6?lang=cat&suite=def.

9. ANNEXES

9.1. DISSENY DELS DIPÒSITS D'UN VEHICLE D'HIDROGEN QUE EMMAGATZEMA L'HIDRUR DE MAGNESI COM A COMBUSTIBLE

Com s'ha vist en l'apartat 5.2.1. *HIDRURS METÀL·LICS*, l'hidrur de magnesi per alliberar l'hidrogen pot ser mitjançant la hidròlisi o la piròlisi. A continuació, es farà el disseny per a cadascú dels mètodes, tenint en compte que es vol generar 6,3 kg d'hidrogen pel vehicle d'hidrogen. Les dades per fer els càlculs són les següents:

Densitat gravimètrica del fraccionament per hidròlisi = 7,43% en massa d'hidrogen

Densitat gravimètrica del fraccionament per piròlisi = 7,66% en massa d'hidrogen

Densitat MgH_2 = 1450 kg/m³

Densitat H_2O = 997 kg/m³

Densitat $\text{Mg}(\text{OH})_2$ = 2340 kg/m³

Densitat Mg = 1738 kg/mol

MM MgH_2 = 26,32 kg/kmol

MM H_2O = 18,02 kg/kmol

MM $\text{Mg}(\text{OH})_2$ = 58,32 kg/kmol

MM Mg = 24,31 kg/kmol

- Disseny del dipòsit mitjançant la hidròlisi.



Com que la reacció té dos reactius i un producte residual es necessitaran tres dipòsits, però s'haurà de tenir en compte que una de les dos molècules d'aigua serà procedent del producte entre la reacció entre l'hidrogen i l'oxigen en la pila de combustible, reduint així a la meitat el dipòsit d'aigua que es necessita.

Si se suposa que el MgH_2 quan reacciona amb el H_2O allibera tot l'hidrogen, per saber la massa de combustible que necessitarà el dipòsit s'haurà de tenir en compte la densitat gravimètrica i el contingut d'hidrogen que es desitgi en el dipòsit:

$$\frac{7,43\% \text{ hidrogen}}{6,30 \text{ kg hidrogen}} = \frac{100\% \text{ reactius}}{X} \rightarrow X = 84,79 \text{ kg reactius}$$

Per seguir la estequiometria de la reacció, s'ha de treballar amb mols i no en massa, per aquest motiu, es calcularà la massa molecular mitjana dels reactius. És important tenir en compte que reaccionen dos mols d'aigua per cada mol d'hidrur de magnesi:

$$\text{MM}_{\text{mitj.}} = \frac{\text{MM MgH}_2 + 2 \cdot \text{MM H}_2\text{O}}{3} = \frac{26,32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} + 2 \cdot 18,02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{3} = 20,78 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$84,79 \text{ kg} \frac{1 \text{ kmol}}{20,78 \text{ kg}} = 4,08 \text{ kmol totals de reactius}$$

$$4,08 \text{ kmol reactius} \frac{1 \text{ kmol MgH}_2}{3 \text{ kmol reactius}} = 1,36 \text{ kmol MgH}_2$$

$$4,08 \text{ kmol reactius} \frac{2 \text{ kmol H}_2\text{O}}{3 \text{ kmol reactius}} = 2,72 \text{ kmol H}_2\text{O}$$

Es necessitarà un dipòsit amb 1,36 kmol MgH_2 , per saber el volum es farà la següent conversió:

$$\begin{aligned} 1,36 \text{ kmol MgH}_2 & \frac{26,32 \text{ kg MgH}_2}{1 \text{ kmol MgH}_2} \frac{1 \text{ m}^3}{1450 \text{ kg MgH}_2} \frac{1000 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{1 \text{ l}}{1 \text{ dm}^3} \\ & = 24,69 \text{ l MgH}_2 \end{aligned}$$

Com ja s'ha comentat, només es requerirà aportar al vehicle la meitat de les molècules d'aigua necessàries, per tant, el dipòsit serà de 1,36 kmol d'aigua, en lloc de 2,72 kmol d'aigua.

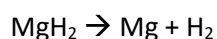
$$1,36 \text{ kmol H}_2\text{O} \frac{18,02 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \frac{1 \text{ m}^3}{997 \text{ kg H}_2\text{O}} \frac{1000 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{1 \text{ l}}{1 \text{ dm}^3} = 24,58 \text{ l H}_2\text{O}$$

En el cas de l'hidròxid de magnesi, com que estequiomètricament per cada mol d'hidrur de magnesi es genera un mol d'aquest producte, es parteix de 1,36 kmol, que serà el residu total que generarà tot el combustible utilitzat.

$$1,36 \text{ kmol Mg(OH)}_2 \frac{58,32 \text{ kg Mg(OH)}_2}{1 \text{ kmol Mg(OH)}_2} \frac{1 \text{ m}^3}{1450 \text{ kg Mg(OH)}_2} \frac{1000 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{1 \text{ l}}{1 \text{ dm}^3} = 33,89 \text{ l Mg(OH)}_2$$

En resum, per obtenir 6,3 kg d'hidrogen a partir de la hidròlisi de l'hidrur de magnesi es necessiten 35,80 kg d'hidrur de magnesi en un dipòsit amb un volum de 24,69 litres i 24,51 kg d'aigua en un altre dipòsit amb un volum de 24,58 litres, requerint d'un tercer dipòsit per emmagatzemar el residu generat per la reacció, l'hidròxid de magnesi, amb un volum de 33,89 litres. Els tres dipòsits sumen un volum total de 83,16 litres.

- Disseny del dipòsit mitjançant la piròlisi.



En aquest cas, com que només es un reactiu i un producte residual, es necessitaran dos dipòsits.

Per a aquest mètode, es faran els mateixos càlculs que en el mètode anterior de la hidròlisi.

$$\frac{7,66\% \text{ hidrogen}}{6,30 \text{ kg hidrogen}} = \frac{100\% \text{ reactius}}{X} \rightarrow X = 82,25 \text{ kg reactius}$$

$$82,25 \text{ kg} \frac{1 \text{ kmol}}{26,32 \text{ kg}} = 3,13 \text{ kmol totals de reactius}$$



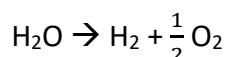
$$3,13 \text{ kmol MgH}_2 \frac{26,32 \text{ kg MgH}_2}{1 \text{ kmol MgH}_2} \frac{1 \text{ m}^3}{1450 \text{ kg MgH}_2} \frac{1000 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{1 \text{ l}}{1 \text{ dm}^3} = 56,72 \text{ l MgH}_2$$

$$3,13 \text{ kmol Mg} \frac{24,31 \text{ kg Mg}}{1 \text{ kmol Mg}} \frac{1 \text{ m}^3}{1738 \text{ kg Mg}} \frac{1000 \text{ dm}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{1 \text{ l}}{1 \text{ dm}^3} = 43,64 \text{ l MgH}_2$$

En aquest cas, a diferència de l'anterior, mitjançant la piròlisi és necessària una massa de combustible d'hidrur de magnesi de 82,25 kg en un dipòsit amb un volum de 56,72 litres. El producte residual, el magnesi, s'emmagatzemarà en un altre amb un volum de 43,64 litres. El volum total dels dos dipòsits suma 100,36 litres.

9.2. CONSUM ENERGÈTIC D'ELECTRÒLISI DE L'AIGUA

La reacció global de l'electròlisi és la següent:



Per saber l'energia necessària per trencar l'enllaç d'aigua es parteix del següent concepte:

$$\Delta H_{\text{formació}} = \sum \Delta H_{\text{enllaços trencats}} - \sum \Delta H_{\text{enllaços formats}}$$

L'energia de formació dels enllaços és: (66)

- Enllaç O-H = $463 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- Enllaç H-H = $436 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- Enllaç O-O = $498 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

En la reacció global es tenen dos enllaços O-H per trencar, i un H-H i mig O-O per formar, per tant, l'energia requerida és:

$$\Delta H_{\text{formació}} = 2 \cdot 463 - 436 - \frac{498}{2} = 241 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{\text{formació}} = 241 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{2,02 \text{ gH}_2} \cdot \frac{1000 \text{ gH}_2}{1 \text{ kgH}_2} = 33,14 \frac{\text{kWh}}{\text{kgH}_2}$$



El rendiment de l'electròlisi és d'un 80%, per tant,

$$\eta = \frac{W_{reacció}}{W_{elèctrica}}$$

$$W_{elèctrica} = \frac{33,14}{0,80} = 41,43 \frac{kWh}{kgH_2}$$

La electròlisi de l'aigua consumeix 41,43 kWh per quilogram produït d'hidrogen.

9.3. CONSUM ENERGÈTIC DE LA SÍNTESI D'HIDRUR DE MAGNESI

L'obtenció de l'hidrur de magnesi es fa a partir de la hidrogenació del magnesi, segons la reacció:

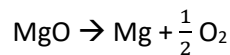
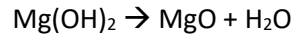


$$\Delta H_{formació} = -18 \frac{kcal}{mol \text{ MgH}_2} \cdot \frac{1kWh}{859,85kcal} \cdot \frac{1mol \text{ MgH}_2}{1mol \text{ H}_2} \cdot \frac{1mol}{2,02gH_2} \cdot \frac{1000gH_2}{1kgH_2} = -10,36 \frac{kWh}{kgH_2}$$

Com es pot veure, l'energia és negativa, per tant, es tracta d'un procés exotèrmic que ens aportarà energia en forma de calor.

9.4. CONSUM ENERGÈTIC DEL RECICLATGE DE L'HIDRÒXID DE MAGNESI

L'element a reciclar és l'hidròxid de magnesi que serà el residu creat en alliberar l'hidrogen de l'hidrur de magnesi a partir de la hidròlisi. Per aconseguir el magnesi en estat pur es duran a terme les següent reaccions:



A continuació es realitzaran els mateixos càlculs que en el cas de l'electròlisi.

L'energia de formació dels enllaços és: (66)

- Enllaç O-H = $463 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- Enllaç H-H = $436 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- Enllaç O-O = $498 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- Enllaç Mg-O = $394 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

En la reacció de descomposició de l'hidròxid de magnesi hi han dos enllaços Mg-O i dos O-H per trencar, i un enllaç Mg-O i dos O-H per formar.

$$\Delta H_{\text{formació}} = 2 \cdot 394 + 2 \cdot 463 - 394 - 2 \cdot 496 = 394 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

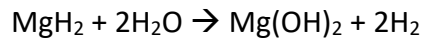
En la reacció de descomposició de l'òxid de magnesi hi ha un enllaç Mg-O per trencar i mig O-O per formar.

$$\Delta H_{\text{formació}} = 394 - \frac{498}{2} = 145 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

El total d'energia requerida per obtenir un altre cop magnesi a partir de l'hidròxid de magnesi és:

$$\Delta H_{\text{formació}} = 394 + 145 = 539 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Es requereix $539 \frac{kJ}{mol}$ per obtenir el magnesi a partir de l'hidròxid de magnesi mitjançant la hidròlisi. Com que, per cada molècula d'hidròxid de magnesi que es genera, s'aconsegueixen dos molècules d'hidrogen:



Per saber l'energia que requerirà el reciclatge del residu en funció de l'hidrogen produït:

$$\Delta H_{\text{formació}} = 539 \frac{kJ}{mol Mg(OH)_2} \cdot \frac{1kWh}{3600kJ} \cdot \frac{1mol Mg(OH)_2}{2mol H_2} \cdot \frac{1mol}{2,02gH_2} \cdot \frac{1000gH_2}{1kgH_2} = 37,06 \frac{kWh}{kgH_2}$$

El procés de reciclatge del residu del vehicle suposarà $37,06 \frac{kWh}{kgH_2}$.

9.5. CONSUM D'AIGUA

Per saber el consum d'aigua per cada quilogram d'hidrogen produït, es fa la següent conversió.

$$1000 \cdot \frac{1mol H_2}{2,02g H_2} \cdot \frac{1mol H_2O}{1mol H_2} \cdot \frac{18,02g H_2O}{1mol H_2O} \cdot \frac{1l H_2O}{997g H_2O} = 8,95 \frac{l H_2O}{kg H_2}$$

Es necessiten 8,95 litres per produir un 1 kg d'hidrogen.

